

## INDICE

Introduzione .....	3
Capitolo 1 – L’AIRPORT PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM.....	5
1.1 Introduzione .....	5
1.2 Obiettivi .....	7
1.3 Requisiti dell’AMPS .....	8
1.4 Benefici ottenibili con l’implementazione di un AMPS .....	11
1.5 Struttura dell’AMPS .....	12
Banca dati.....	14
Le indagini sullo stato della pavimentazione .....	19
Sistemi di analisi dei dati .....	36
Procedure di gestione .....	38
Capitolo 2 –QUADRO DELLE NORMATIVE PER APMS .....	42
2.1 ICAO.....	42
2.2 EASA .....	43
2.3 America .....	44
2.4 Canada.....	48
2.5 Italia .....	50
2.6 Cina .....	54
Capitolo 3 – A.I.R.P.O.R.T.S.....	59
3.1 Introduzione .....	59
3.2 Inventario .....	60
3.3 Modelli di prestazione dei materiali.....	60
3.4 Previsione delle prestazioni della pavimentazione.....	62
3.5 Alternative di M&R .....	63
3.6 Ottimizzazione .....	63
Capitolo 4 – ELMOD 6.....	66
4.1 Introduzione .....	66
4.2 Benefici di ELMOD 6.....	67
4.3 Vantaggi di ELMOD 6 .....	68
4.4 Moduli di ELMOD 6.....	69
4.5 Modulo LCCA .....	71
Capitolo 5 – ANALISI LCCA DI UNA PISTA DI UN AEROPORTO ITALIANO.....	76
5.1 Acquisizione dei dati .....	76
5.11 Acquisizione dei dati di portanza (FWD).....	76
5.12 Acquisizione degli spessori (GPR).....	78
5.13 Rilievi degli ammaloramenti superficiali, regolarità longitudinali e trasversali, macrotestirature (MFV).....	82
5.2 Elaborazione dei dati.....	88
5.21 Determinazione del modulo elastico .....	88
5.22 Determinazione dell’indice ACN/PCN .....	89
5.23 Analisi dello spettro di traffico.....	93

5.24 Valutazione della regolarità.....	119
5.25 Determinazione per il livello di ormaimento.....	121
5.26 Valutazione del livello di ammaloramento superficiale .....	123
5.3 Elaborazione con LCCA .....	127
5.4 Risultati dell'analisi LCCA.....	134
5.5 Risultati con il doppio traffico .....	141
5.6 Confronti tra i due casi.....	146
5.7 Risultati con il traffico aggiuntivo del B777-200.....	148
5.8 Confronti tra il caso del traffico normale e il caso del traffico con il B777-200 aggiuntivo .....	155
5.9 Conclusioni delle elaborazioni .....	157
CONCLUSIONI .....	159
BIBLIOGRAFIA .....	163

## **Introduzione**

Il rapido sviluppo del settore dell'aviazione civile negli ultimi anni ha determinato un incremento del numero di movimenti aerei annui, nonché del numero di passeggeri trasportati. Gli aeroporti sono gli elementi fondamentali del trasporto aereo commerciale e le pavimentazioni aeroportuali ne costituiscono una componente essenziale della zona operativa; anche se le fasi svolte dal velivolo incidono relativamente poco, in termini di tempo su tali superfici, le manovre del velivolo sono particolarmente delicate in termini di sicurezza. Per questo motivo, è necessario disporre di un apposito sistema di gestione e manutenzione, al fine di monitorare le caratteristiche prestazionali necessarie e garantire, conseguentemente, un certo livello di sicurezza con continuità ed efficienza.

La conoscenza dello stato delle pavimentazioni è la condizione necessaria per poter programmare gli interventi manutentivi a breve e lungo termine, in funzione degli scenari di traffico futuro e del budget a disposizione. È quindi di fondamentale importanza disporre di informazioni precise riguardo le condizioni strutturali e funzionali delle pavimentazioni aeroportuali per consentire una corretta programmazione degli interventi di manutenzione e di gestione al fine di ottimizzare le risorse economiche disponibili, garantendo nel contempo il mantenimento di standard di sicurezza previsti dalle Normative.

Le Società di Gestione degli aeroporti sono state sollecitate ad avvalersi di metodi e di strumenti che, attraverso un'analisi delle condizioni delle pavimentazioni, possano definirne le caratteristiche strutturali e funzionali residue, predire la rimanente di vita utile nelle condizioni attuali di ammaloramento e di traffico e suggerire i provvedimenti manutentivi per consentire il funzionamento della pavimentazione stessa in sicurezza.

Lo strumento di gestione della pavimentazione, che fornisce un metodo sistematico di valutazione delle condizioni attuali, la corretta programmazione degli interventi di manutenzione e la determinazione delle priorità e del tempo ottimale di intervento, è il Pavement Management System (PMS).

Il PMS è un sistema in grado di aiutare tecnici ed ingegneri a valutare in maniera oggettiva strategie alternative di manutenzione e/o riabilitazione nel rispetto dei vincoli economici/prestazionali.

Nell'ambito della presente Tesi sono state analizzate tre sezioni omogenee della pista di volo 07/25 dell'Aeroporto Falcone-Borsellino di Palermo, al fine di determinare una scala di priorità degli interventi manutentivi necessari e del tempo ottimale di intervento; per far ciò è stata utilizzata l'applicazione LCCA (Life Cycle Cost Analysis) del software ELMOD 6.

Sono state inoltre valutate le evoluzioni delle condizioni strutturali e funzionali di ciascuna sezione analizzata in relazione agli effetti dell'incremento del traffico aeroportuale, assumendone diverse ipotesi di traffico.



# **Capitolo 1 – L’AIRPORT PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM**

## **1.1 Introduzione**

Il “Pavement Management System” (PMS) offre una procedura che ha lo scopo di mantenere le pavimentazioni in una condizione di efficienza per un determinato intervallo di tempo considerando una serie di limiti economici. Questo sistema permette al gestore di valutare le alternative di manutenzione e riqualifica in maniera ottimale nel rispetto dei vincoli economici e/o prestazionali valutando le condizioni attuali dell’infrastruttura e predire quelle future.

L’adozione del PMS come strumento di gestione delle pavimentazioni avvenne intorno agli anni ‘70, inizialmente in ambito stradale, e solo dal 1995 in poi “l’Airport Pavement Management System” (APMS) è stato adottato dai Gestori Aeroportuali: l’approccio sistemico viene applicato ampiamente per i problemi di manutenzione negli Stati Uniti e in Canada, mentre in Italia è comparso molto più tardi.

In ambito strettamente aeroportuale, la gestione ottimale e la manutenzione delle sovrastrutture destinate alla circolazione degli aeromobili costituiscono un obiettivo fondamentale per i Gestori Aeroportuali in quanto la stessa richiede l’utilizzo di ingenti risorse finanziarie dirette ad assicurare un elevato livello prestazionale delle pavimentazioni, tale da garantire la piena operatività aeroportuale sotto le diverse condizioni ambientali.

Oggi le diverse Normative si occupano l’APMS nel mondo. In America la FAA (Federal Aviation Administration) AC (Advisory Circular) 150/5320-7B riguardo l’“Airport Pavement Management Program”, scrive “APMS is a set of defined procedures for collecting, analyzing, maintaining, and reporting pavement data. APMS assists airports in finding optimum strategies for maintaining pavements in a safe serviceable condition over a given period for the least cost.”, in altre parole, APMS è una serie di procedure per raccogliere, analizzare, mantenere, reportare dei dati delle pavimentazioni al fine di trovare una ottimale strategia per manutenzione rispetto dei vincoli economici/prestazionali in un determinato periodo. A livello internazionale ICAO ha adoperato “Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation– Volume I – Aerodrome Design and Operations” nella quinta riunione della sessione 198<sup>th</sup> il 27 febbraio 2013, questa Normativa impone lo stesso concetto,

cioè l'adozione di un programma di manutenzione in grado di mantenere le pavimentazioni in condizioni di sicurezza, funzionalità ed efficienza. A livello nazionale l'ENAC in Italia – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile ha pubblicato recentemente “Airport Pavement Management System – Linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni – Ed. 1 del 01 Ottobre 2015”, queste linee guida definiscono criteri ritenuti accettabili dall'Enac per la pianificazione ed esecuzione dei controlli e della manutenzione necessaria per le pavimentazioni aeroportuali.

Ad oggi l'“Airport Pavement Management System” (APMS) è diventato uno strumento molto importante finalizzato alla gestione delle sovrastrutture aeroportuali, all'attività ispettiva e di programmazione finalizzata all'ottimizzazione delle risorse economiche assicurando un determinato livello prestazionale della sovrastruttura.

La definizione elementare dell'APMS indica lo stesso come un “processo che fornisce procedure sistematiche e oggettive per: il mantenimento dell'inventario delle pavimentazioni, il monitoraggio delle prestazioni della pavimentazione, la selezione dell'intervento più appropriato e nel momento opportuno per una determinata pavimentazione attraverso le previsioni delle condizioni future delle pavimentazioni, la pianificazione e la previsione di spesa per le attività di manutenzione e la valutazione dell'efficacia in termini economici delle attività svolte in passato”.

Valutando il tasso di deterioramento delle pavimentazioni e analizzando il costo dell'intero ciclo di vita, determina il ottimale periodo in cui applicare la migliore strategia di intervento ed evitare il maggiore costo futuro. Si osserva dalla figura 1, riportata a seguire, come la pavimentazione mantenga adeguati livelli prestazionali per la maggiore parte della sua vita utile, però quando giunge ad una condizione critica, inizia a deteriorare rapidamente. Quindi se il programma M&R viene applicato in presenza del livello di deterioramento incipiente, oltre 50% di costo del intervento può essere risparmiato. Quindi, mantenere e conservare una pavimentazione in una condizione cosiddetta “good”, rispetto a riabilitare una pavimentazione in condizioni “fair to poor” risulta essere da quattro a cinque volte meno costoso e aumenta inoltre la sua vita utile. Il numero degli anni in cui le pavimentazioni stanno in condizioni “good” prima di raggiungere il punto critico del rapido deterioramento dipende dai diversi fattori (tipo di costruzione e qualità, uso della pavimentazione, condizione

ambientale, e manutenzione). Quindi l'AMPS è uno strumento utile al gestore per individuare il punto critico durante la vita utile della pavimentazione.

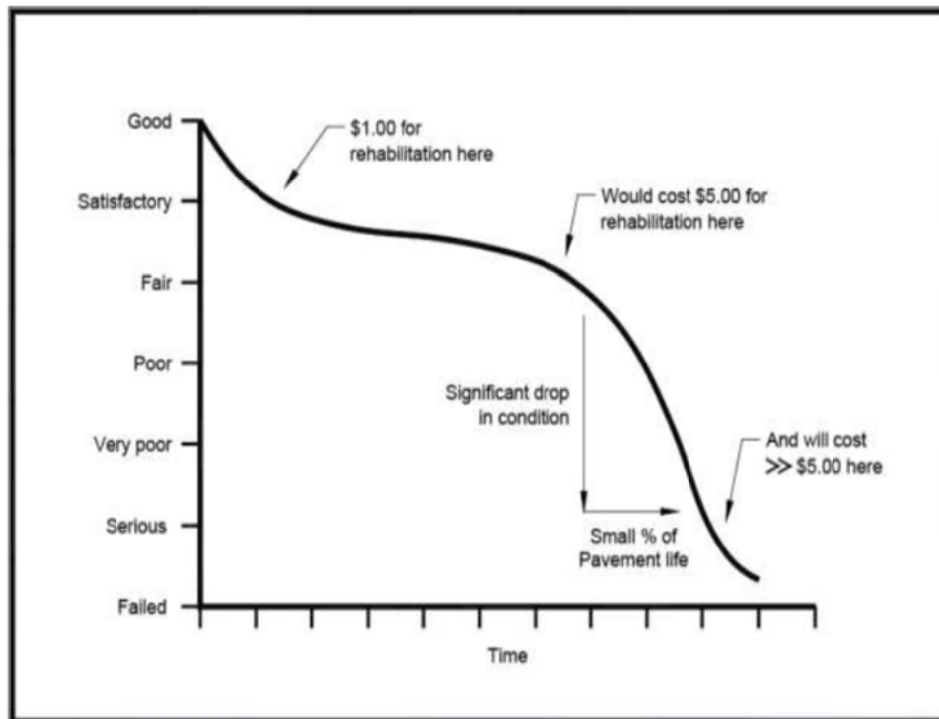


Figura 1:Tipiche condizioni della pavimentazione durante la sua vita utile

## 1.2 Obiettivi

L'obiettivo generale consiste nel prendere le decisioni accurate per le esecuzioni del piano di M&R (Manutenzione & Riabilitazione), studiando le prestazioni delle pavimentazioni in un aeroporto network con l'utilizzo dell'AMPS. Inoltre si eseguiranno analisi e le pianificazioni per la progettazione futura delle pavimentazioni e per i nuovi modelli di aeroplano (per esempio A350).

Gli obiettivi dell'APMS possono essere distinti in due tipi in funzione del livello gestionale.

Nella gestione delle infrastrutture si è soliti individuare due livelli gestionali: livello di rete e livello di progetto.

Nel primo caso, gli obiettivi dell'attività a livello di rete, riguardando l'intero patrimonio di pavimentazioni (ad esempio tutte le pavimentazioni dell'aeroporto o di più aeroporti), sono

relazionati principalmente al processo di pianificazione e di finanziamento delle strategie d'intervento e consistono nel:

1. determinare lo stato attuale delle pavimentazioni;
2. determinare le condizioni delle pavimentazioni a breve e lungo termine;
3. identificare le necessità di manutenzione e/o riabilitazione delle pavimentazioni;
4. definire le risorse finanziarie necessarie per far fronte alle necessità individuate;
5. scegliere le opzioni e le strategie di finanziamento possibili;
6. valutare le conseguenze che le opzioni di finanziamento individuate hanno sullo stato di conservazione del sistema di pavimentazioni e sulla qualità del servizio offerto all'utenza;
7. valutare la strategia e le opzioni di finanziamento ottimali;
8. individuare i progetti da finanziare secondo quanto indicato dalla strategia prescelta.

A livello di progetto, invece, che è più concentrato verso le soluzioni tecniche da prendere per una specifica sezione, gli obiettivi perseguiti riguardano l'individuazione della migliore strategia di manutenzione e/o riabilitazione in uno specifico intervento in rapporto ai costi d'investimento, alla fattibilità in funzione delle condizioni di traffico, dei benefici per l'utenza e la società con un certo livello di budget e altri vincoli esistenti. Gli obiettivi dell'attività a livello di progetto consistono nel:

1. individuare le cause degli ammaloramenti presenti;
2. studiare gli interventi possibili da adottare per eliminare le cause di deterioramento individuati;
3. analizzare l'efficacia tecnica ed economica dei diversi possibili interventi;
4. valutare il confronto tecnico-economico tra interventi possibili (costi/benefici);
5. individuare uno specifico intervento di manutenzione o riabilitazione, compresa la scelta dei materiali e le modalità di realizzazione;

### **1.3 Requisiti dell'AMPS**

Per far funzionare la sequenza di macro-operazioni correttamente, l'APMS deve avere i seguenti requisiti generali:

- a. L'Airport Pavement Management System (APMS) deve essere capace di predire le condizioni strutturali e funzionali delle pavimentazioni (piste, vie di rullaggio, e piazzali) in futuro (per esempio per 30 anni) e determinare le strategie più economiche di M&R e definirne le relative priorità;
- b. Le condizioni strutturali delle pavimentazioni devono essere predette, utilizzando i principi Meccanici e Empirici. I moduli dei materiali devono essere determinati dalle prove non distruttive (NDT) e le condizioni funzionali (visual distresses, roughness and skid resistance) dalle attrezzature per la raccolta di dati ad alta velocità (per esempio High-Speed Runway Surface Profiler);
- c. L'Airport Pavement Management System (APMS) deve essere capace di modellare le condizioni di ogni Ramo (descritto nel dettaglio nel prossimo paragrafo) in futuro in termine di capacità strutturale, condizione visuale, rugosità e ormaia, usando i modelli incremental-recursive (incremento di un'anno o una stagione), e la resistenza all'attrito utilizzando i modelli empirici;
- d. I dati misurati devono essere raccolti e archiviati nella database dell' APMS e il sistema deve avere la capacità di usare i dati storici per calibrare i modelli incremental-recursive;
- e. Il sistema deve avere la procedura di ottimizzazione per determinare le strategie più economiche di M&R e i parametri delle condizioni strutturali e funzionali, basando sulla valutazione delle conseguenze sullo stato delle pavimentazioni e sul costo dell'intero ciclo di vita dei diversi livelli di budget;
- f. Deve valutare il budget necessario per assicurare il raggiungimento di predeterminati obiettivi (ad esempio livelli minimi di prestazione attesi)

Per svolgere le attività e perseguire gli obiettivi prima menzionati il sistema di gestione dovrà avere i requisiti dettagliati:

- ♦ l'intero patrimonio di sovrastrutture sotto il controllo del gestore aeroportuale, deve essere suddivisa nelle entità fisiche (Ramo, Sezione, Unità di monitoraggio);
- ♦ Identificare le sezioni da mantenere;

- ♦ Definire il tipo di aeroplano dall'asse o configurazione dei carrelli (peso dell'asse, pressione del pneumatico e distanza della ruota);
- ♦ Salvare i dati storici e previsti del traffico per i individuali anni e ogni tipo di aeroplano;
- ♦ Impostare i fattori dell'incremento di traffico per ogni tipo di aeroplano;
- ♦ Impostare i modelli del decadimento di ogni tipo di materiale (incremental-recursive strain or stress models) per predire le condizioni dei moduli elastici degli strati, rugosità e ormarie in futuro;
- ♦ Considerare le influenze di ogni tipo di carico dell'aeroplano per modellare le condizioni degli strati delle pavimentazioni;
- ♦ Impostare i modelli per gli attriti superficiali
- ♦ Impostare i modelli per gli effetti dell'invecchiamento e della penetrazione d'acqua;
- ♦ Impostare i modelli empirici per le rugosità e ormaie come un'alternativa per le sezioni in cui i dati strutturale delle pavimentazioni non sono utilizzabili per i modelli analitici;
- ♦ Calibrare i meccanici-empirici modelli a livello sezionale;
- ♦ Calibrare automaticamente i meccanici-empirici modelli per tutte le sezioni, usando i dati storici e di traffico;
- ♦ Impostare le condizioni relative ai modelli di costo per ogni tipo di aeroplano;
- ♦ Effettuare le analisi effect/cost, includendo i calcoli del costo totale, costo dell'agenzia e costo capitale;
- ♦ Le previsioni delle prestazioni delle pavimentazioni per le possibili alternative di M&R durante le analisi sono visibili graficamente;
- ♦ Mostrare i dati storici delle condizioni, e diagramma i dati delle prestazioni prediti dai modelli analitici o empirici per la calibrazione;
- ♦ Collezionare le alternative di M&R per le diverse categorie della rete di pavimentazione;
- ♦ Impostare i limiti critici per ogni tipo di condizione;
- ♦ Fare le analisi e pianificazioni delle manutenzioni per 30 anni;
- ♦ Effettuare le ottimizzazioni delle strategie di M&R per la rete di pavimentazione o il

gruppo di sezione definito;

- ♦ Trovare un valore obiettivo per le ottimizzazioni in termine di diminuzione del costo totale o minimizzare il costo dell'agenzia o la combinazione dei due costi, considerando il limite del budget annuo;
- ♦ Confrontare graficamente le soluzioni delle diverse ottimizzazioni basate sui diversi budget;

#### **1.4 Benefici ottenibili con l'implementazione di un AMPS**

L'implementazione di un APMS per la gestione delle pavimentazioni aeroportuali, al pari di quelle stradali, richiede un'attenta valutazione dei costi e dei benefici che ne comporta, da affrontare preliminarmente. Il successo relativo all'applicazione di una sistema di gestione non è immediato e richiede una capacità gestionale in grado di valutare i diversi scenari possibili. Tale aspetto assume maggiore risalto per gli operatori che, di fatto, hanno sempre applicato una politica esclusivamente di tipo manutentivo dettata da valutazioni visive basate sull'esperienza acquisita nel tempo. In linea generale, nell'implementazione di un APMS, i benefici che si possono ottenere, e che debbono essere ricercati da parte dell'operatore nella fase di avvio, sono:

- ✧ Promuovere la costituzione di un unico "luogo" dove vengono accumulate informazioni quali condizioni delle pavimentazioni, dati sulla realizzazione e storico degli interventi di manutenzione e riabilitazione;
- ✧ Effettuare una oggettiva e coerente valutazione della condizione della pavimentazione nel medio-lungo termine;
- ✧ Migliorare la programmazione degli interventi manutentivi, in particolare costituendo un supporto per la scelta della tipologia d'intervento da eseguire;
- ✧ Incrementare la vita utile della pavimentazione;
- ✧ Valutare l'efficacia degli interventi eseguiti in passato;
- ✧ Determinare le strategie di M&R tenendo conto dei esigenze operative in futuro e/o progetti di espansione dell'aeroporto;
- ✧ Identificare i requisiti delle risorse economiche necessarie per mantenere la

funzionalità della pavimentazione con un certo livello prestazionale;

- ✧ Indicare all'operatore quale politica economica applicare;
- ✧ Documentare le condizioni delle pavimentazioni in futuro e in passato;
- ✧ Analizzare i costi dell'intero ciclo di vita per le diverse strategie di M&R;
- ✧ Identificare l'impatto sulla pavimentazione, se non vengono eseguite le riparazioni importanti;
- ✧ Ottimizzare l'organizzazione del personale;

### **1.5 Struttura dell'AMPS**

L'Airport Pavement Management System rappresenta uno strumento di supporto all'aspetto decisionale e alla pianificazione mirata alla gestione tecnicamente ed economicamente sostenibile per il mantenimento delle condizioni ottimali delle pavimentazioni aeroportuali in conformità alla Normativa vigente in materia e per un arco determinato arco temporale. Grazie ad un'opportuna definizione del livello gerarchico e ad una strategia del gestore ben definita, l'APMS consente di individuare le aree aventi priorità di intervento in maniera oggettiva e sistematica consentendo allo stesso tempo una rapida e opportuna programmazione dei lavori e allocazione del budget necessario.

In termini generali, un sistema di gestione si può strutturare nei seguenti settori (Figura 2):

- Una banca dati, per la raccolta di tutte le informazioni sulle pavimentazioni;
- Una serie di indagini sullo stato della pavimentazione, svolte con cadenza regolare;
- Un sistema di analisi dei dati;
- Procedure di gestione



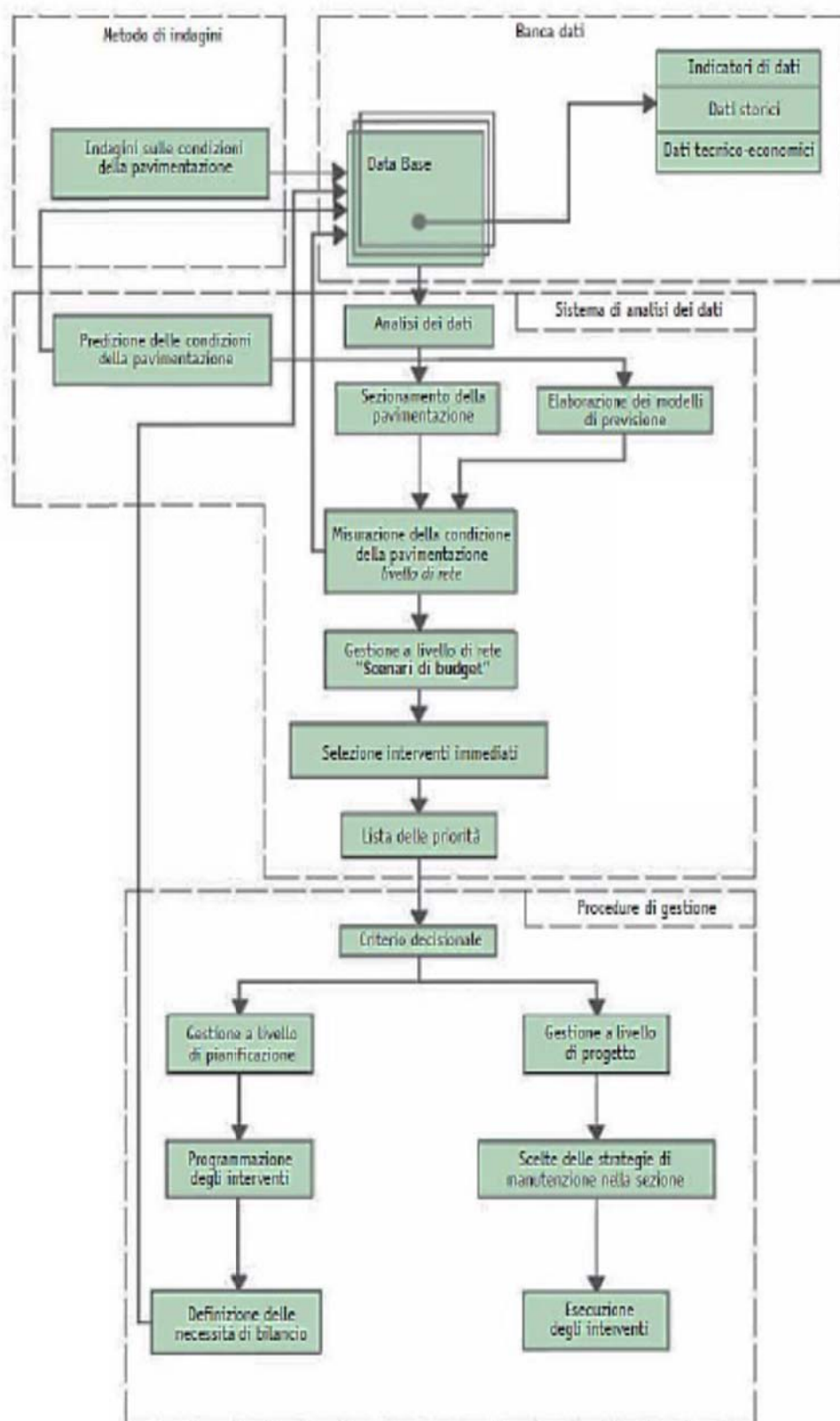


Figura 2:Struttura di un AMPS

## **Banca dati**

La banca dati svolge un ruolo chiave all'interno dei sistemi di gestione; infatti viene spesso indicata come il primo elemento del sistema "PMS".

La creazione di un archivio dei dati finalizzato alla gestione richiede che vengano affrontate una serie di problematiche concernenti:

- ♦ la strutturazione della banca dati (architettura del sistema, organizzazione, utenti, caratteristiche dei dati, ecc.);
- ♦ la scelta dei dati in essa contenuti;
- ♦ le modalità di aggiornamento;

Per quanto concerne l'architettura generale quella più diffusamente impiegata è quella di tipo relazionale la quale è peraltro compatibile con l'utilizzazione di sistemi GIS, dei quali si suggerisce l'impiego, anche ai fini di una integrazione della banca dati del sistema di manutenzione delle infrastrutture con le altre banche dati esistenti all'interno dell'organizzazione aziendale.

Nell'archivio informatizzato dei dati vengono raccolte tutte le informazioni utili e necessarie al gestore. Queste comprendono:

- ♦ la suddivisione delle pavimentazioni in rami, sezioni omogenee e unità di monitoraggio;
- ♦ i dati di inventario che comprendono le informazioni storiche riguardanti la stratigrafia della pavimentazione, sia costruzione originaria che dopo gli eventuali successivi interventi di manutenzione, i dati di traffico, i dati geometrici, i dati ambientali, i costi e le politiche di gestione;
- ♦ i dati relativi allo stato strutturale e prestazionale delle pavimentazioni, anch'essi riferiti sia alla prima costruzione che ai successivi interventi di manutenzione.

Tutte queste informazioni sono indispensabili per definire il comportamento nel tempo della pavimentazione stessa.

### **Suddivisione delle pavimentazioni**

La banca dati delle pavimentazioni aeroportuali deve essere organizzata secondo una

struttura in cui la rete, che rappresenta l'intero patrimonio di sovrastrutture sotto il controllo del gestore aeroportuale, quindi il primo passo nella creazione di un APMS è l'identificazione e la definizione di una rete. E' necessario definire quali elementi identificare come appartenenti ad una rete. Ogni rete sarà gestita separatamente all'interno di un sistema informatico APMS. Uno dei vantaggi più significativi nella suddivisione in reti è legato all'efficienza dei dati di ingresso da gestire e alla generazione dei report. La rete deve essere suddivisa nelle seguenti entità fisiche:

- ♦ Ramo (branch): una grandezza unitaria della rete che svolge una specifica funzione, tipicamente i rami sono rappresentati dalle piste, dalle vie di rullaggio dalle bretelle di collegamento e dai piazzali, a titolo di esempio ogni pista costituisce un ramo. Ogni ramo è composto da almeno una sezione, ma può essere composto anche da più sezioni, se le caratteristiche della pavimentazione variano fortemente all'interno di esso;
- ♦ Sezione (section): una parte di un ramo che può essere considerata "omogenea" sotto il profilo manutentivo e costituisce la unità minima sulla quale programmare gli interventi di manutenzione e riabilitazione. L'omogeneità dei fattori da prendere in considerazione nell'individuazione delle sezioni intende la costanza della composizione strutturale (spessore e materiali), il costante traffico, la stessa storia della costruzione, la stessa tipologia di pavimentazione, le stesse infrastrutture per il drenaggio e le spalle e le stesse condizioni d'uso.
- ♦ Unità di monitoraggio (sample unit): una parte della sezione considerata nelle attività di monitoraggio e sulla quale sono eseguiti i rilievi degli ammaloramenti indicati dal Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveye (ASTM-D-5340-11);

### **Dati di inventario**

Le categorie dei dati di inventario, devono includere:

- ♦ i dati storici relativi alla costruzione e manutenzione;
- ♦ i dati di traffico;
- ♦ i dati geometrici;

- ♦ i dati relativi ai costi;
- ♦ i dati ambientali;
- ♦ i dati legati alle politiche di gestione.

I dati storici relativi alla costruzione ed agli interventi di manutenzione sono essenziali sia per l'impiego dei modelli per la valutazione previsionale delle prestazioni della pavimentazione, impiegati per la pianificazione, la programmazione ed il progetto, che per lo sviluppo e la calibrazione dei modelli stessi. Devono fornire informazioni circa la configurazione strutturale iniziale delle pavimentazioni e nella loro forma più estesa essi pertanto comprendono:

- ♦ la tipologia di pavimentazione (flessibile, rigida, semirigida);
- ♦ gli spessori ed il tipo di materiale impiegato (conglomerato bituminoso, misto granulare, ecc.) nei vari strati della pavimentazione e la qualità dei materiali impiegati (modulo elastico, resistenza alla trazione indiretta o stabilità Marshall per i conglomerati bituminosi, resistenza alla trazione per flessione dei calcestruzzi, modulo resiliente dei misti granulari, composizione delle miscele ecc).

Le informazioni concernenti gli interventi di manutenzione e riabilitazione possono comprendere oltre alla tipologia di intervento, ai tempi di effettuazione dell'intervento ed alle eventuali modifiche alla configurazione strutturale della pavimentazione, anche dati relativi alle caratteristiche dei materiali impiegati (resistenza alla trazione per flessione dei cls, resistenza alla trazione indiretta, ecc.), all'impresa esecutrice ed ai risultati dei controlli di qualità effettuati.

I dati di traffico sono informazioni necessarie oltre che per la previsione dell'evoluzione del degrado delle pavimentazioni, e quindi delle prestazioni delle pavimentazioni, anche per la definizione delle priorità di intervento. Le informazioni minime riguardano:

- ♦ volume di traffico (numero di movimenti giornalieri o annui sulle sezioni);
- ♦ spettro del traffico (suddivisione del traffico in categorie di aeroplano).

Lo spettro di traffico può essere rappresentato a vari livelli di dettaglio a partire dalla suddivisione in 6 categorie operata dall'Annesso 14 dell'ICAO (basata sulla sola apertura alare, a cui corrispondono approssimativamente caratteristiche simili in termini di massa e configurazione dei carrelli), fino ad arrivare ad una rappresentazione in base ai tipi di

aeroplano.

Nell'ICAO Annesso 14 - Aerodrome Reference Code Element 2, Table 1-1 descrive la classificazione dell'aeromobile in 6 lettere (A,B,C,D,E,F) in funzione della apertura alare e configurazione dei carrelli ( Figura 3).

Code element 1		Code element 2		
Code number	Aeroplane reference field length	Code letter	Wing span	Outer main gear wheel span <sup>a</sup>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Less than 800 m	A	Up to but not including 15 m	Up to but not including 4.5 m
2	800 m up to but not including 1 200 m	B	15 m up to but not including 24 m	4.5 m up to but not including 6 m
3	1 200 m up to but not including 1 800 m	C	24 m up to but not including 36 m	6 m up to but not including 9 m
4	1 800 m and over	D	36 m up to but not including 52 m	9 m up to but not including 14 m
		E	52 m up to but not including 65 m	9 m up to but not including 14 m
		F	65 m up to but not including 80 m	14 m up to but not including 16 m

Figura 3:Aerodrome Reference Code

Tra i modelli di aeromobile attualmente in servizio rientrano tipicamente nella tipologia A il PIPER PA-31 e il CESSNA 404 Titan, nella tipologia B il BOMBARDIER Regional Jet CRJ-200 e il DE HAVILLAND CANADA DHC-6, nella tipologia C il BOEING 737-700 , l'AIRBUS A-320 e l'EMBRAER ERJ 190-100, nella tipologia D il B767 e l'AIRBUS A-310, nella tipologia E il B777, il B787 Series e l'A330 e nella tipologia F il BOEING 747-8 e l'AIRBUS A-380-800.

Altri dati che possono essere inseriti nella sezione traffico sono:

- ♦ l'incremento medio annuo del volume di traffico;
- ♦ la variazione dello spettro di traffico futuro;

Il fattore di incremento del traffico negli anni futuri è un dato fondamentale per la valutazione previsionale dei volumi di traffico nel periodo di analisi scelto per la pianificazione e programmazione delle attività di manutenzione.

I dati geometrici servono per definire le caratteristiche fisiche delle pavimentazioni e costituiscono elemento essenziale dell'inventario, comprendono: lunghezza e larghezza della

sezione, tipo e larghezza delle spalle, pendenza longitudinale, pendenza trasversale, ecc.

I dati relativi ai costi devono comprendere i costi degli interventi di costruzione, riabilitazione e manutenzione, generalmente espressi per metro quadrato di intervento o per metro cubo di materiale, compresi tutti gli oneri relativi alla effettuazione del lavoro. Tutti i costi sono indicati dal prezzario regionale o nazionale.

I dati ambientali riguardano le condizioni ambientali (piogge, nevi, venti, temperature ecc.) che hanno un considerevole effetto sul comportamento delle pavimentazioni e sullo sviluppo del decadimento delle pavimentazioni. possono anche influenzare la scelta delle tipologie di interventi manutentivi che vengono presi in considerazione dal sistema di gestione, quindi può limitare la libertà di esecuzione di un determinato intervento.

I dati ambientali minimi che devono essere rilevati sono riportati nella figura 4;

Nome	Descrizione	Unità di Misura
Tm-m	Temperatura media mensile	°C
Tx-m	media della temperatura massima dell'intero mese	°C
Tn-m	media della temperatura minima dell'intero mese	°C
Tn < 0	numero medio di giorni al mese con temperatura minima inferiore o uguale a 0 °C	(conteggio)
Rtot	media della quantità di precipitazione cumulata mensile	mm
Rmin	minimo della precipitazione cumulata mensile	mm
Rmax	massimo della precipitazione cumulata mensile	mm

Figura 4:Dati ambientali minimi

I dati legati alle politiche di gestione possono essere i vincoli che vengono imposti per effetto di predeterminate politiche di gestione e non appare opportuno qui analizzarle. Appare però opportuno segnalare alcuni aspetti ricorrenti. Uno dei più importanti è l'individuazione del budget (o stanziamento di fondi) destinato alla gestione delle pavimentazioni, e la sua eventuale suddivisione fra attività di manutenzione e riabilitazione/costruzione.

## **Dati sullo stato strutturale e prestazionale**

Per pianificare e programmare gli interventi manutentivi è indispensabile, oltre al monitoraggio e alla conoscenza puntuale dei differenti tipi di intervento, disporre di indicatori di stato e delle relative curve di decadimento nel tempo. Questa esigenza ha prodotto negli scorsi decenni una moltitudine di indicatori delle condizioni di stato delle pavimentazioni stradali e aeroportuali da un numero notevole di studi sperimentali. La scelta degli indici utilizzati andrà ad influenzare l'intero sistema di gestione per tutte le fasi critiche dell'elaborazione dei dati: dalla valutazione delle condizioni alla previsione del degrado nel tempo.

Tuttavia, solo negli ultimi anni, le conoscenze acquisite sono state razionalizzate con l'obiettivo di individuare i parametri di stato più idonei e le relative curve di decadimento.

Gli indicatori di stato della pavimentazione possono essere suddivisi nelle seguenti classi:

1. Regolarità longitudinale;
2. Regolarità trasversale;
3. Aderenza;
4. Macrotessitura;
5. Dissesti superficiali;
6. Caratteristiche strutturali

I dati minimi sullo stato prestazionale e strutturale delle pavimentazioni, devono includere:

- ♦ la portanza;
- ♦ ammaloramento superficiale;
- ♦ regolarità longitudinale e trasversale;
- ♦ macrotessitura;
- ♦ l'aderenza.

## **Le indagini sullo stato della pavimentazione**

L'AMPS deve indagare la misura degli indicatori sopra esposti (la portanza della

pavimentazione, dissesti superficiali, regolarità longitudinale e trasversale, macrotestitura, aderenza) com'è illustrato nella figura 5, dopo di che si fa riferimento alle rispettive Normative vigenti.

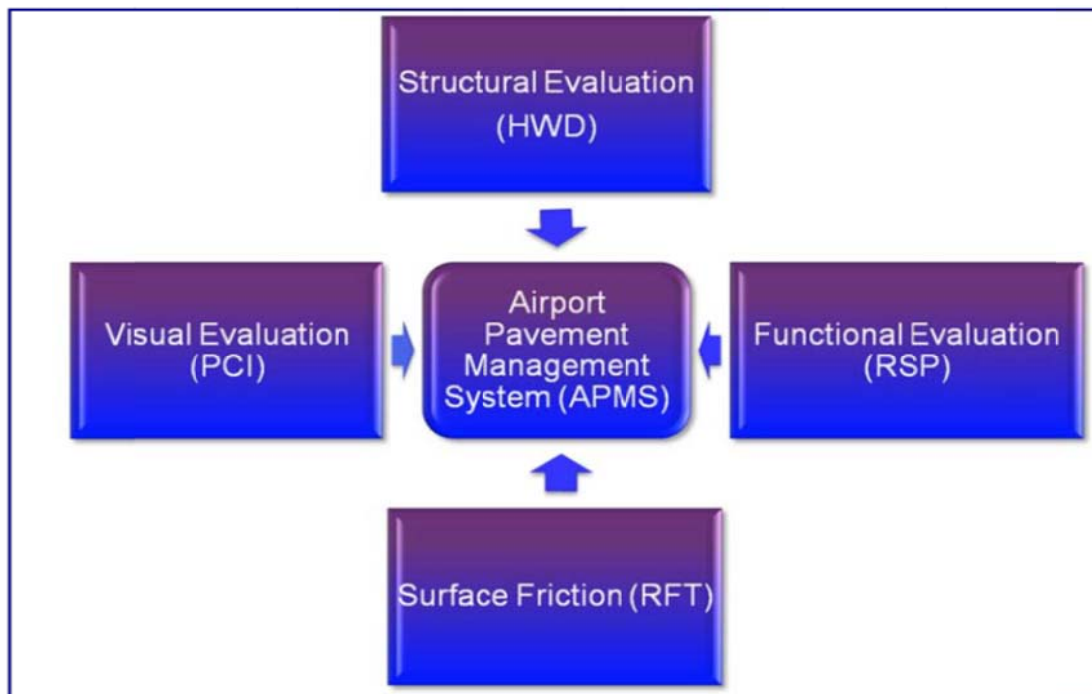


Figura 5: Indagini sullo stato della pavimentazione

### **Indagini rispetto alla valutazione strutturale**

Le prove per determinare le caratteristiche strutturali delle pavimentazioni possono essere distruttive o non distruttive, e possono essere tese alla definizione delle caratteristiche meccaniche di portanza della pavimentazione nel suo complesso o dei materiali che la costituiscono.

La definizione delle caratteristiche necessitano inoltre della conoscenza degli spessori degli strati costituenti la pavimentazione. Anche questi possono essere misurati con apparecchiature non distruttive ad alto rendimento, quale ad esempio il GPR (Ground Penetrating Radar), che comunque richiede dei carotaggi (Dynamic Cone Penetrometer "DCP") per la sua calibrazione.

Per la realizzazione delle misure di portanza si utilizzano apparecchiature di tipo deflettometrico statiche o dinamiche ed in particolare le apparecchiature deflettometriche a carico impulsivo (Falling Weight Deflectometer "FWD" o Heavy-Falling Weight Deflectometer "HWD").



In campo aeroportuale si usa l'Heavy Falling Weight Deflectometer (tipo the Dynatest Model 8081 HWD) com'è rappresentata nella figura 6, deflettometro dinamico a massa battente, in grado di simulare adeguatamente le condizioni reali di carico di un aeroplano con un ampio rango di tale carico.



Figura 6:HEAVY WEIGHT DEFLECTOMETER (HWD)

I dati generati da l'HWD vengo analizzati mediante processo di backcalculation utilizzando i diversi software ( tipo RO.ME, ELMOD 6 ) com'è rappresentato nella figura 7.

Si devono stimare i seguenti valori:

- ♦ i valori dei moduli E1, E2, E3 rispettivamente degli strati in conglomerato bituminoso, di fondazione e del sottofondo nelle condizioni di prova;
- ♦ la vita residua a fatica delle pavimentazioni espressa in anni;
- ♦ lo strato più critico;
- ♦ il rinforzo a fatica teorico per sopportare il traffico di progetto (se è necessario);
- ♦ calcolo dei valori ACN/PCN secondo la Normativa ICAO.

Dalle prove sulle pavimentazioni rigide si deve stimare:

- ♦ il modulo del sottofondo;
- ♦ il modulo di reazione del sottofondo;
- ♦ la vita residua della pavimentazione espressa in anni;
- ♦ lo spessore teorico di rinforzo a fatica (se è necessario).

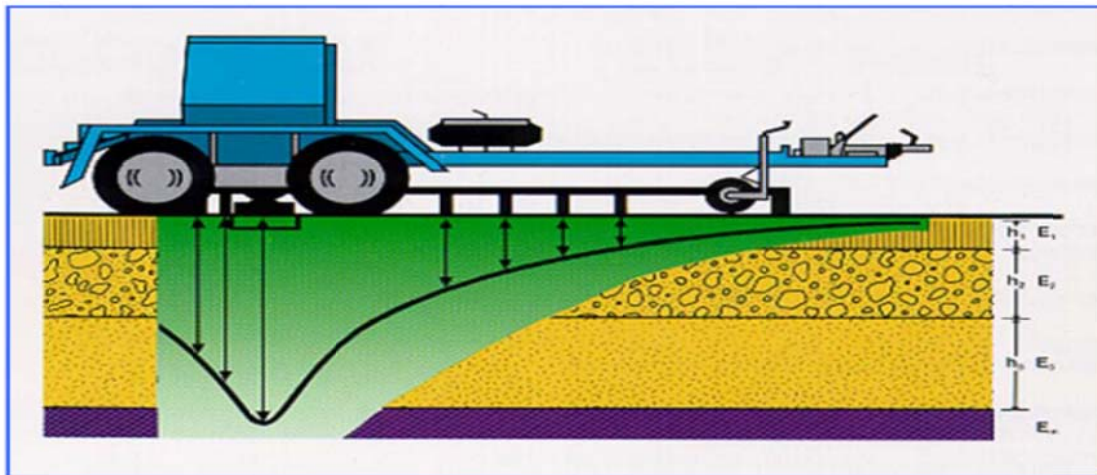


Figura 7:Schema di backcalculation

Per le prove non distruttive lo standard che è usato ampiamente sia a livello di progetto che a livello di rete è il FAA AC 150/5370-11B “Use of non destructive testing in the evaluation of airport Pavements”. Questa circolare specifica gli offset di 3, 6, 20 m dalla CL (centerline) per la pavimentazione flessibile, anche per la pavimentazione rigida specifica nel giunto longitudinale, trasversale e centro della lastra. Come sono rappresentate nelle figure 8 e 9:

Test type	Jointed PCC and HMA overlaid PCC				HMA			
	Project level		Network level		Project level		Network level	
	Offset, ft. (m)	Spacing, ft. (m)	Offset, ft. (m)	Spacing, ft. (m)	Offset, ft. (m)	Spacing, ft. (m)	Offset, ft. (m)	Spacing, ft. (m)
Center	10 (3) 30 (9) 65 (20)	100 (30) 100-200 (30-60) 400 (120)	10 (3)	200-400 (60-120)	10 (3) 20 (6) 65 (20)	100 (30) 100-200 (30-60) 200-400 (60-120)	10 (3)	200-400 (60-120)
Transverse Joint	10 (3) 30 (9) 65 (20)	100-200 (30-60) 200-400 (60-120) 400 (120)	10 (3)	400 (120)				
Longitudinal Joint	20 (6) 40 (12) 60 (18)	200 (60) 400 (120) 400 (120)						
Corner	20 (6) 40 (12) 60 (18)	200 (60) 400 (120) 400 (120)						

Figura 8:Tipiche localizzazioni e spaziature delle prove sulla pista e via di rullaggio(5370-11B)

Test type	Jointed PCC and HMA overlaid PCC		HMA, ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	
	Project level	Network level	Project level	Network level
Center	1 test for every 10 to 20 slabs	1 test for every 30 to 60 slabs	1 test for every 1,970 to 4,000 (600 to 1200)	1 test for every 5,750 to 11,490 (1750 to 3,500)
Transverse Joint	1 test for every 10 to 40 slabs	1 test for every 60 slabs		
Longitudinal Joint	1 test for every 20 to 40 slabs	1 test for every 60 slabs		
Corner	1 test for every 20 to 40 slabs			

Figura 9:Tipiche localizzazioni e spaziature delle prove sul piazzale (5370-11B)

## Indagini rispetto alla valutazione funzionale

Per quanto riguarda le indagini sulla valutazione funzionale, l'AMPS deve raccogliere i dati funzionali delle pavimentazioni, come abbiamo detto la regolarità longitudinale e trasversale e la macrotestitura.

Un indice standardizzato che racchiude l'informazione necessaria a definire la regolarità di una superficie aeroportuale, come definito dal World Bank Technical Paper n. 45, 1986, è l'IRI (International Roughness Index). L'IRI è stato definito come un indice sintetico per la valutazione funzionale di un profilo stradale bidimensionale (una fetta longitudinale della strada che mostra elevazione come varia in funzione della distanza longitudinale lungo una pista), misurato in mm/metro, ed è utilizzato per definire una caratteristica del profilo longitudinale di una carreggiata percorsa. Dalla sua introduzione nel 1986, l'IRI è diventato l'indice di asperità stradali più comunemente usato in tutto il mondo per la valutazione e la gestione dei sistemi stradali.

La macrotestitura si riferisce al campo metrico compreso tra 0,5 mm e 50 mm con ampiezze tra 0,2 mm e 10 mm, è la rugosità dovuta all'insieme delle asperità intergranulari ed è dovuta alla forma, alla dimensione ed al posizionamento degli elementi lapidei che affiorano dal conglomerato; nel caso di pavimentazioni in calcestruzzo essa è costituita anche dalla forma, dalla profondità, dal distanziamento, dalla larghezza, dalla simmetria e dalla direzione di eventuali striature.

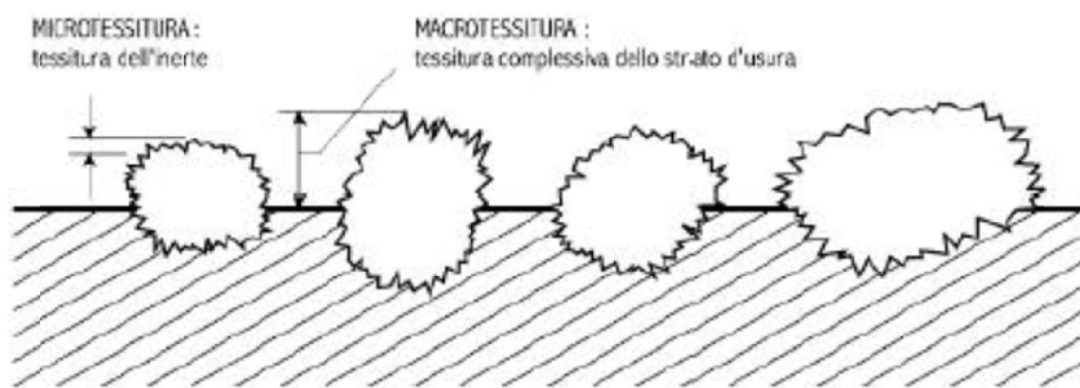


Figura 10: Definizione di macrotestitura

La macrotestitura è collegata anche alla modalità di posa in opera ed alla composizione della miscela e la sua durezza nel tempo deriva dalle caratteristiche mineralogiche delle

rocce di provenienza degli inerti, identifica la rugosità della pavimentazione che determina le condizioni di drenaggio superficiale, la deformazione del battistrada, l'aderenza alle alte velocità in condizione di superficie bagnata ed infine le proprietà acustiche.

Per indagare queste informazioni si effettuano rilievi con il profilometro laser, utilizzato per il rilievo di regolarità, dei profili longitudinali e trasversali della pavimentazione. Il Profilometro è in grado di rilevare il profilo reale della pavimentazione nelle coordinate XY (relative), ove X è la progressiva chilometrica misurata dall'odometro e Y rappresenta il profilo piano-altimetrico della pista di volo. Si può anche identificare le ampiezze dell'irregolarità per onde corte, medie, lunghe, questo è molto importante per individuare le cause delle irregolarità. Quando l'irregolarità è dovuta alle onde corte è presumibile che la causa sia da ricercare negli strati superficiali della pavimentazione (ammaloramenti e stesa irregolare), mentre l'irregolarità dovuta alle onde medie e lunghe può essere dovuta a problemi di assestamento anomali degli strati di fondazione o del sottofondo della struttura aeroportuale. Per tutti questi processi si ha bisogno di un apposito software per analizzare i profili trasversali, le ormaie e le tessiture.

Uno dei più utilizzabile apparecchiature è il Dynatest High-Speed Runway Surface Profiler (RSP), questo RSP (vede Figura 11) è una apparecchiatura autorizzata dall'ASTM E950, e che può essere utilizzata per condurre le prove anche in America.



Figura 11: Dynatest Runway Surface Profiler

### **Indagini rispetto alla valutazione dell'ammaloramento superficiale**

Il sistema per la valutazione degli ammaloramenti superficiali più utilizzato è quello

descritto nella norma ASTM D5340-11 Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys. La norma indica la procedura da effettuare per determinare la condizione di una sovrastruttura aeroportuale, sia flessibile, realizzata in conglomerato bituminoso, sia rigida, realizzata in calcestruzzo armato; il livello qualitativo della pavimentazione viene indicato attraverso l'indice P.C.I. (Pavement Condition Index), il quale attraverso un numero progressivo compreso tra 0 e 100, fornisce indicazioni sullo stato della pavimentazione. La valutazione si basa sostanzialmente sull'ispezione visiva dell'addetto riguardo le condizioni della sovrastruttura, dipende dal numero e dal tipo di ammaloramenti; il procedimento di elaborazione consente in secondo luogo di definire l'indice P.C.I..

Come abbiamo visto precedentemente la rete viene suddivisa in rami, poi in sezioni, poi in unità di monitoraggio in funzione della tipologia di pavimentazione e del tipo di traffico. Il metodo del P.C.I. viene utilizzato per definire l'indice di ogni unità di monitoraggio. Per definire l'indice relativo ad ogni sezione si applica un algoritmo illustrato nella Normativa che consente di ottenere una media ponderata dell'indice. Questo metodo non da utilizzare per la determinazione analitica delle caratteristiche di portanza della pavimentazione, o per la valutazione della regolarità superficiale e le proprietà di aderenza della superficie analizzata; per il calcolo di questi parametri è necessario ricorrere ad indagini specifiche per l'ammaloramento superficiale.

Gli ammaloramenti superficiali delle pavimentazioni flessibili sono classificati in 4 categorie mediante le ispezioni visive:

- ♦ **Difetti Superficiali:**

- 1. Asportazione di materiale

Il fenomeno rappresenta la progressiva perdita di materiale dalla superficie della pavimentazione. Il distacco della pellicola di bitume dagli aggregati avviene per il progressivo indurimento del bitume dovuto agli agenti atmosferici, la cattiva compattazione (specialmente quando avviene in climi freddi), quantitativo di bitume nella miscela non sufficiente.



Nei casi di fenomeni lievi o moderati avviene il distacco delle particelle più fini; il



fenomeno diviene grave quando il distacco interessa anche le particelle più grandi.

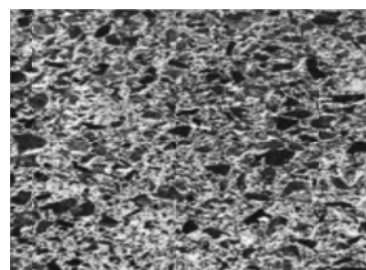
## 2.Refluimento di bitume

Il fenomeno rappresenta l'eccessiva presenza di bitume sulla superficie della pavimentazione, è dovuto ad una eccessiva quantità di bitume nel conglomerato bituminoso (errata progettazione della miscela) o ad un ridotto contenuto di vuoti (o ad entrambi). le condizioni di aderenza possono risultare notevolmente ridotte nel caso di pavimentazione bagnata mentre con alte temperature la pavimentazione può divenire abbastanza "appiccicosa".



## 3.Superficie levigata e scivolosa

Il fenomeno del Polishing rappresenta la levigatura degli aggregati della superficie della pavimentazione a causa dell'azione ripetuta del traffico. Le asperità degli granuli degli aggregati vengono asportate per azione ripetuta dei pneumatici



### ♦ **Deformazioni Superficiali:**

#### 1.Ormaie

Le ormaie (Rutting) rappresentano una depressione superficiale della pavimentazione localizzata lungo le tracce delle ruote. Ai lati delle ormaie possono verificarsi rigonfiamenti, avvengono per compattazione o per scorrimenti (miscele bituminose poco resistenti)



#### 2.Distorsioni del piano viabile (ondulazioni, scorrimenti, assestamenti, rigonfiamenti per gelo)

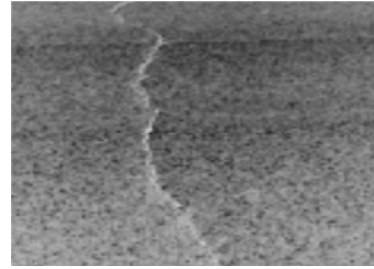
Le ondulazioni e gli assestamenti del piano viabile possono verificarsi quando la miscela bituminosa è instabile a causa della scarsa qualità degli aggregati impiegati o di un errato mix-design. Altre distorsioni del piano viabile possono essere dovuti a cedimenti e rigonfiamento per gelo.



### ♦ **Fessure:**

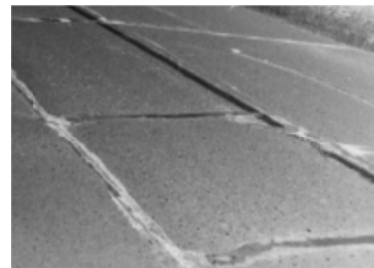
#### 1.Di origine termica

Le fessure di origine termica si presentano generalmente a distanze regolari. La causa è il movimento del materiale dovuto alle variazioni di temperatura e all'indurimento del bitume nel tempo. Si presentano inizialmente ad intervalli ampi (decine di metri) con piccolissime aperture. Nel tempo si presentano ulteriori fessure (con passo più ravvicinato) e l'apertura aumenta progressivamente nel tempo.



## 2. Per riflessione

Le fessure di riflessione sono quelle che si originano in superficie su tappeti di ricopertura di pavimentazioni fessurate. Sono causate dai movimenti della pavimentazione sottostante lo strato superficiale dovuto a variazioni termiche. Questi movimenti generano nello strato di overlay stati tensionali elevati che generano la risalita delle fessure.



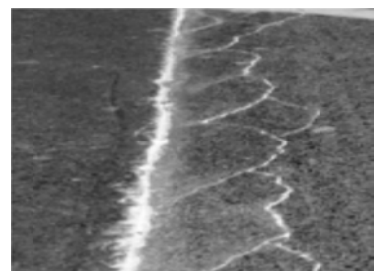
## 3. Per scorrimento

Le fessure di scorrimento sono causate dallo scorrimento tra lo strato superficiale e la pavimentazione sottostante. Sono caratterizzate dalla forma a mezzaluna con i punti iniziali e finali delle fessure più indietro rispetto alla direzione del traffico. Sono in genere localizzate nei punti di arresto, di partenza o di svolta quando la miscela superficiale ha scarse caratteristiche qualitative o il legame con lo strato sottostante è di scarsa qualità.



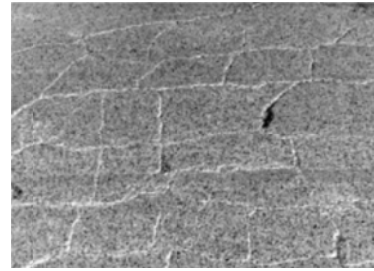
## 4. In corrispondenza dei giunti o dei bordi

Le fessure che si verificano in corrispondenza dei giunti di costruzione sono causate da scarsa compattazione o inadeguato legame tra le due stese. Possono essere anche causate da un inadeguato attacco allo strato sottostante. Si verificano anche entro 50 cm dal margine della stesa sono dovute a scarso supporto del margine, inadeguate condizioni di drenaggio e azione del gelo.



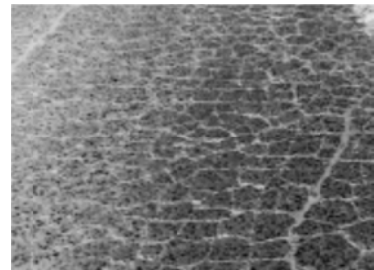
### 3.A blocchi

Le fessure a blocchi rappresentano uno stato fessurativo interconnesso che crea larghi blocchi di dimensioni da 30 cm a 3 m. Le fessure sono generalmente interconnesse ad angolo retto e sono causate dal ritiro del conglomerato bituminoso dovuto ai cicli termici giornalieri. Più ravvicinata è la spaziatura delle fessure e maggiore è l'invecchiamento della miscela bituminosa che genera ritiro e indurimento del bitume.



### 4.A pelle di coccodrillo

Le fessure a pelle di coccodrillo identificano uno stato fessurativo interconnesso che crea piccoli blocchi di dimensioni da 3 cm a 30 cm. La causa è dovuta alla rottura della pavimentazione per effetto dei carichi del traffico (rottura a fatica): le fessure si generano alla base del conglomerato bituminoso e si propagano in superficie. Si verificano in corrispondenza delle aree caricate dal traffico.

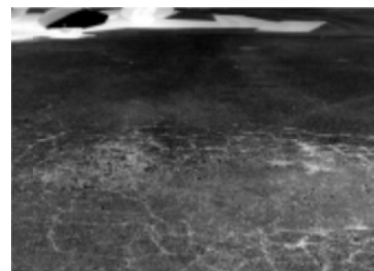


### ♦ **Rappezzi e Buche**

Il rappezzo è una porzione di pavimentazione originaria riparata con conglomerato bituminoso ad indicare la rimozione di un difetto o il riempimento di uno scavo. Indipendentemente dal suo stato un rappezzo viene considerato un difetto della superficie della pavimentazione. I rappezzi caratterizzati da fessure, cedimenti o distorsioni indicano che il difetto originario non è stato completamente riparato.



Le buche e la perdita di materiale sono causate dai carichi del traffico, fatica e inadeguata resistenza della pavimentazione. Spesso sono associate anche a scarse condizioni di drenaggio delle acque e possono causare pericolose perdite di materiali (FOD).





Per le pavimentazioni rigide gli ammaloramenti rilevabili sono anche classificati in 4 categorie:

♦ **Difetti Superficiali:**

1. Superficie levigata e scivolosa

Il fenomeno rappresenta la levigatura degli aggregati della superficie della pavimentazione a causa dell'azione ripetuta del traffico. La malta superficiale e le asperità dei granuli degli aggregati vengono asportate per azione ripetuta dei pneumatici.



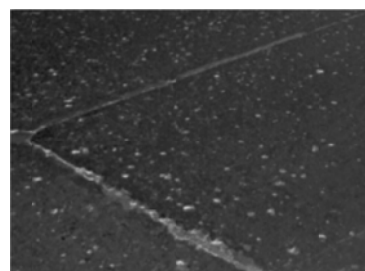
2. Fessure a mappa

Viene chiamato sistema fessurativo a “mappa” un insieme di fessure sottili distanziate una decina di centimetri. Generalmente si sviluppano in maglie geometriche di forma approssimativamente quadrata e possono essere causate da una cattiva cura del getto o improprie lavorazioni sulla superficie.



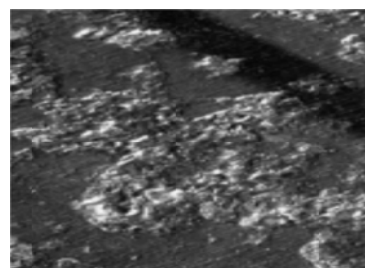
3. Asportazioni di aggregati grossi

Il pop-out indica la perdita di aggregati grossi o piccoli pezzi di calcestruzzo dalla superficie della pavimentazione. Il fenomeno può essere dovuto ad aggregati “espansivi” (cioè con elevato livello di assorbimento di acqua, porosi) sotto l'azione di cicli gelo-disgelo (problema di materiali + fattori ambientali). Questo quadro fessurativo può anche essere indice di cattiva qualità degli aggregati che portano a reazioni alcalisilicati (ASR – Alkali-Silica-Reactivity).



4. Perdita di aggregati fini e di malta

Generalmente questo fenomeno è dovuto a una cattiva lavorazione del calcestruzzo che rende la superficie suscettibile ai danni provocati dall'azione del gelo.



## 5. Perdita di parti di cls dai bordi

Si rappresenta la perdita di porzioni di calcestruzzo dalla superficie della pavimentazione lungo i bordi delle fessure o lungo i giunti (Crack spalling, Joint spalling). Il fenomeno è dovuto al degenerarsi della fessura, alla cattiva qualità del calcestruzzo o ai cicli gelo-disgelo.



### ♦ **Giunti:**

#### 1. Giunti longitudinali e trasversali

Con il passare degli anni i giunti possono deteriorarsi e diventare più ampi con conseguente ulteriore deterioramento. L'intrusione di materiale nel giunto può determinare la comparsa di fessure longitudinali parallele al giunto con il rischio di spalling. Assestamenti, instabilità o fenomeni di pompaggio degli strati sottostanti la lastra possono causare la rottura del giunto.

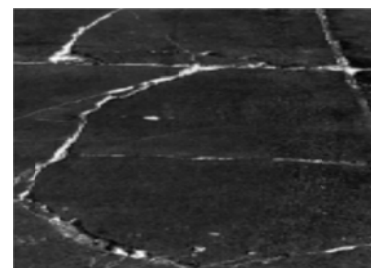


Una possibile causa di ammaloramento del giunto è l'eccessiva attesa prima della sua formazione che genera la fessurazione della lastra nella zona in prossimità del giunto di costruzione.

### ♦ **Fessure:**

#### 1. Fessure della lastra

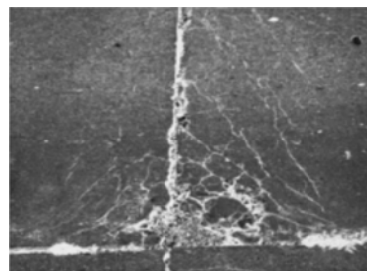
Le fessure dividono la lastra in due o più parti. Possono essere causate da tensioni termiche, scarsa portanza degli strati di supporto o carico eccessivo. Alcune volte le fessure possono essere dovute ad eccessiva spaziatura dei giunti. Lastre con rapporti tra i lati superiori a 1.25 hanno maggiori probabilità di sviluppare fessurazioni.



#### 2. Fessurazione a D

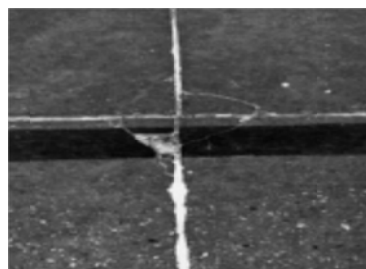
L'utilizzo di aggregati di scarsa qualità può occasionalmente portare ad ammaloramenti gravi. Gli ammaloramenti chiamati fessure a "D" si verificano quando gli aggregati hanno

elevata capacità di assorbimento di acqua. Tale ammaloramento si genera nella parte bassa della lastra e migra verso la superficie. Il problema si manifesta con fessure sottili e una colorazione scura in prossimità dei giunti.



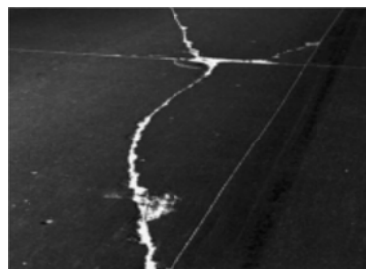
### 3.Fessure d'angolo

In corrispondenza degli angoli delle lastre possono svilupparsi fessure diagonali che formano un triangolo con i giunti. Generalmente la distanza dall'angolo è di 50-100 cm e sono causate da scarsa portanza degli strati di supporto o eccessivo carico da traffico associato ai movimenti termici della lastra. Possono svilupparsi inizialmente come fessure sottili che iniziano dalla superficie e migrano verso il basso o verso il giunto.



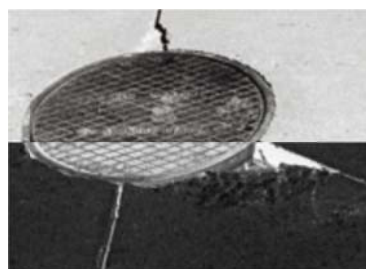
### 4.Fessure vaganti

Questo tipo di ammaloramento indica quelle fessure che si sviluppano e migrano in modo casuale. Possono attraversare la lastra diagonalmente o in maniera casuale. La causa di questo fenomeno è da ricercare nella mancanza di drenaggio, nella carenza di supporto degli strati sottostanti la lastra o nel loro rigonfiamento per gelo o assestamento al disgelo.



### 5.Fessure a tombini e caditoie

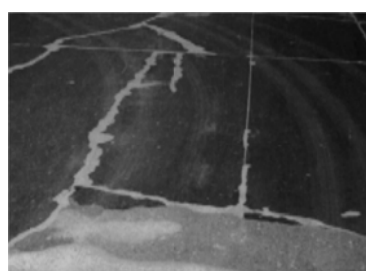
La pavimentazione in prossimità di tombini e caditoie necessita di particolari cure in quanto può non essere in grado di sopportare i movimenti dovuti a variazioni termiche e rigonfiamenti da gelo. L'insorgere di fessure aggrava la situazione di degrado che tende a peggiorare rapidamente.



## ♦ **Distorsioni del piano viabile:**

### 1.Assestamenti o rigonfiamenti

Terreni di sottofondo instabili e poco drenanti possono causare assestamenti della pavimentazione dopo la



costruzione. Gli assestamenti possono essere causati anche da trincee scavate per il passaggio di sottoservizi e non adeguatamente compattate. Possono verificarsi leggere depressioni o bruschi avvallamenti. I terreni suscettibili al gelo associati a livelli di falda sub-superficiali possono generare rigonfiamenti durante i mesi invernali.

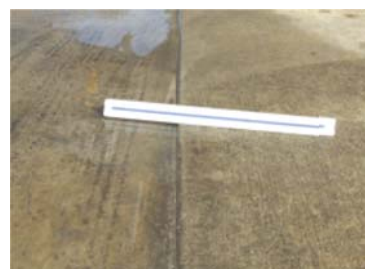
## 2.Sollevamenti

Le lastre in calcestruzzo possono sollevarsi o frantumarsi in corrispondenza dei giunti. Il fenomeno è causato dall'espansione del calcestruzzo quando del materiale incompressibile (sabbia, detriti, ecc.) si infiltra nei giunti non adeguatamente sigillati. Quando le pavimentazioni soggetti a fenomeni di reazione alcali-silicati hanno mostrato una maggiore tendenza ai fenomeni di sollevamento.



## 3.Scalinamento

Lo scalinamento è causato dal fenomeno del pompaggio del terreno di fondazione e dalla creazione di vuoti al di sotto delle lastre adiacenti. Quindi i giunti possono presentare scalini dovuti al cedimento di una lastra adiacente. La presenza di traffico pesante accelera velocemente l'evoluzione del fenomeno, e provoca un veloce deterioramento della lastra.



## 4.Riparazioni, Rappezzi e Buche

La ricostruzione delle lastre o l'installazione di sottoservizi richiede l'esecuzione di tagli e rappezzi. I rappezzi possono avere prestazioni simili alla pavimentazione originaria oppure presentare scorrimenti, deterioramento dei giunti o ammaloramenti. Rotture localizzate del terreno di sottofondo possono causare singole buche. La frantumazione del materiale superficiale o altri difetti possono creare buche localizzate.



La valutazione dell'indice P.C.I. può comunque essere resa più accurata se sono disponibili dati integrativi quali, ad esempio, indagini deflettometriche oppure indagini per la determinazione della regolarità superficiale. Determinato l'indice P.C.I. per tutta la

sovrastuttura, il monitoraggio continuo della pavimentazione consente di valutare il decadimento della sovrastuttura e la calibrazione di un modello previsionale tale da permettere la programmazione degli interventi preventivi di riabilitazione.

Per la corretta valutazione deve essere valutato un numero  $n$  di unità monitoraggio che non deve essere inferiore al numero ricavato dalla relazione:

$$n = \frac{N * S^2}{\left[ \left( \frac{e^2}{4} \right) * (N - 1) + S^2 \right]}$$

$e$  = errore accettabile (si assume  $\pm 5$  P.C.I.);

$N$  = numero di unità di monitoraggio della sezione;

$S$  = deviazione standard.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(PCI_i - PCIf)^2}{n - 1}}$$

$PCIf$  = media aritmetica di tutte le unità semplici della sezione.

L'indice P.C.I. relativo alla sezione oggetto di studio ( $PCIs$ ) si ottiene dall'applicazione della formula della media ponderata, calcolata tra tutte le unità semplici analizzate, di seguito indicata:

$$PCIs = \frac{\sum_1^n (PCI_{ri} * Ari)}{\sum_1^n Ari}$$

$PCI_{ri}$  = indice PCI dell'unità di monitoraggio random  $i$ -esima;

$Ari$  = Area dell'unità monitoraggio random  $i$ -esima;

$n$  = numero totale delle unità random.

Il rilievo dell'ammaloramento superficiale sulle pavimentazioni rigide e flessibili è necessario per:

- ♦ monitorare il degrado superficiale e la sua evoluzione nel tempo;
- ♦ individuare aree che necessitano di interventi urgenti;
- ♦ predisporre interventi di manutenzione preventiva e curativa per rallentare o bloccare il processo di degrado e quindi prolungare la vita utile della pavimentazione;
- ♦ limitare i costi di manutenzione ordinaria delle sovrastrutture.

Quindi per questo rilievo dell'ammaloramento si può adottare i diversi prodotti commerciali: per esempio la tecnologia ADE (Automatic Distress Evaluation) di RODECO, il

Laser Crack measuring System (LCMS) d'INO (Figura 12).

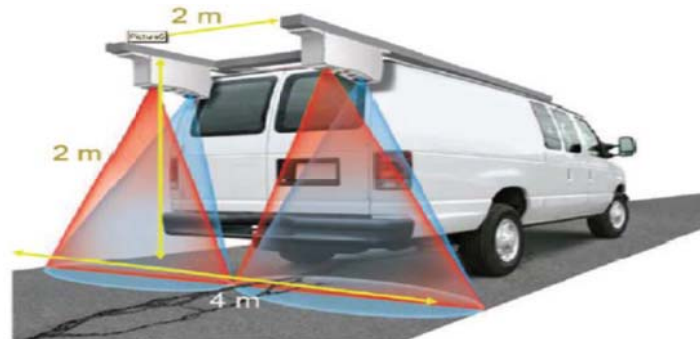


Figura 12:Laser Crack measuring System (LCMS)

Tramite la recente tecnologia di 3d camera è possibile ricavare le immagini digitali ad alta risoluzione. dalle quali vengono registrate e analizzate con un apposito software, a diversi livelli di severità, le principali tipologie d'ammaloramento (ad esempio fessurazioni ,rappezzi, ormaie, ect, per poter ricavare l'indice PCI che tiene di conto del numero di ammaloramenti presenti, della tipologia degli ammaloramenti e della severità di ognuno.

La scala di gravità del PCI (tra 0 a 100) è la seguente:

- ♦  $70 \leq \text{PCI} < 100$  adeguato;
- ♦  $55 < \text{PCI} < 70$  ammaloramento medio;
- ♦  $\text{PCI} \leq 55$  ammaloramento elevato.

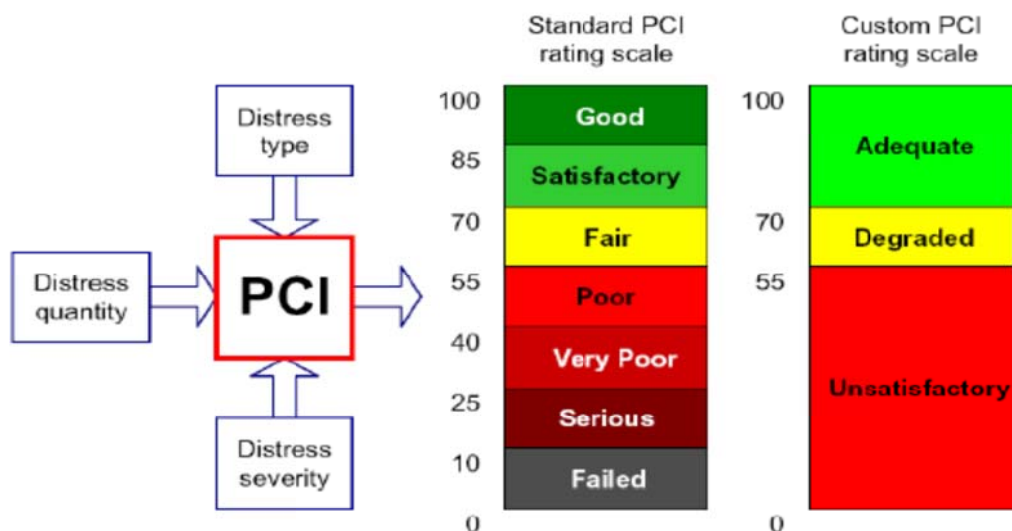


Figura 13:Componenti di determinazione del PCI

### **Indagini rispetto alla valutazione d'aderenza**

La misura dell'aderenza delle pavimentazioni riveste particolare importanza ai fini dei livelli di sicurezza del traffico aereo. La caratterizzazione della qualità della superficie delle pavimentazioni dal punto di vista dell'aderenza invece deve essere effettuata secondo quanto previsto dagli standard in vigore, Circolare ENAC APT 10 nonché del documento 9137 dell'ICAO "Airport service manual – Pavement surface condition", periodicamente mediante attrezzatura di misurazione continua dotata di sistema autobagnante, effettuando le rilevazioni per ciascun terzo di pista.

In base alla tipologia di strumentazione utilizzata è possibile effettuare misure di tipo locale o misure in continuo. Le misure di tipo locale possono essere effettuate con strumenti classici come il British Pendulum, che ormai trova un modesto impiego solo in campo stradale. Gli strumenti attualmente più diffusi per effettuare dei rilievi sono i cosiddetti CFME "Continuous Friction Measurement Equipment" indicati dalla FAA Circular AC 150/5320-12C, che offrono il vantaggio di raccogliere dati lungo tutta la pista semplicemente percorrendo con un veicolo strumentato (ovvero trainando il carrello strumentato) con un notevole risparmio di tempo. Con questi strumenti ad alto rendimento è possibile rilevare praticamente in continuo, ogni 5 o 10 metri di pavimentazione in condizione bagnata. Durante le prove la ruota frenata è costantemente bagnata con acqua per mezzo di un distributore collegato ad un serbatoio installato sul veicolo trainante. Il flusso d'acqua è regolato con una pompa elettronica in modo da garantire lo spessore voluto (1 mm così come richiesto dalla norma).

Ci sono attualmente molte apparecchiature di misura in uso in tutto il mondo, quali ad esempio quelle riportate nella circolare ENAC: il Mu-meter Trailer, lo Skiddometer Trailer, il Surface Friction Tester Vehicle, il Runway Friction Tester Vehicle, il TATRA Friction Tester Vehicle ed il GripTester Trailer.



Figura 14:Runway Friction Tester



## Sistemi di analisi dei dati

Le analisi dei dati hanno come obiettivi la previsione futura dell'evoluzione delle condizioni della pavimentazione nel tempo e di fornire un supporto per l'APMS manager al fine di individuare il momento più opportuno per la realizzazione di un certo intervento, in funzione degli obiettivi che sono stati preventivamente selezionati (politica del gestore) tramite un modello di degrado, come una funzione delle variabili esplicative o fattori che tengono conto della struttura della pavimentazione, dell'età, dei carichi del traffico e delle variabili ambientali.

Per l'implementazione di modelli di degrado il gestore deve impegnare una parte considerevole delle risorse nel monitoraggio dei dati sullo stato funzionale e strutturale delle pavimentazioni per potere riuscire a individuare l'evoluzione storica delle prestazioni al fine di impiegarla nelle operazioni di pianificazione degli interventi di manutenzione e riabilitazione.

I modelli di degrado possono essere classificati in funzione della metodologia operativa di sviluppo degli stessi, in base alla quale è possibile distinguerli in:

- ♦ modelli empirici, sviluppati dall'analisi statistica dei dati sull'evoluzione del degrado, strutturale o funzionale delle sovrastrutture, misurati sia in sito su pavimentazioni in esercizio che in laboratorio su sovrastrutture in scala reale;
- ♦ modelli empirico-meccanicistici, sviluppati a partire sia dai risultati delle analisi sul comportamento meccanico delle sovrastrutture che dalle misure sperimentali effettuate in sito ed in laboratorio;
- ♦ modelli meccanicistici, sviluppati attraverso l'analisi teorica del comportamento delle sovrastrutture.

Per lo sviluppo di un'APMS durante gli anni sono stati sviluppati numerosi modelli di degrado associati a indicatori di regolarità (International Roughness Index - IRI), all'aderenza disponibile (Skid Number SN oppure Coefficiente di attrito  $\mu$ ), alla capacità portante (Modulo elastico E) e ad ammaloramenti superficiali (PCI - Pavement Condition Index), al numero di passaggi di assi standard, alle caratteristiche ambientali. Se correttamente sviluppati, possono essere molto validi anche indicatori ottenuti dalla combinazione di diversi indicatori.



A livello di rete, i modelli sono principalmente utilizzati per previsioni del livello prestazionale nel medio e lungo termine, definizione di budget, programma di monitoraggio e pianificazione interventi manutentivi. A livello di progetto i modelli sono utili alla scelta dello specifico intervento manutentivo in relazioni alle condizioni di traffico e climatiche previste. L'utilizzo dei modelli costituisce la componente più importante nel caso di analisi del tipo life-cycle cost (LCC) mirata alla comparazione delle diverse strategie manutentive.

Mediante l'utilizzo di modelli di degrado si ricava la curva di degrado della pavimentazione, da questa curva di decadimento il gestore aeroportuale studia “come”, “dove”, “quando” intervenire per il raggiungimento della vita utile teorica della pavimentazione (tipo 20 anni) in funzione del budget e del livello di qualità. Se non effettua gli interventi in modo opportuno, la pavimentazione è destinata a degradarsi in modo brusco, riducendo nettamente la vita utile della pavimentazione ed aumentando notevolmente i costi per la riabilitazione

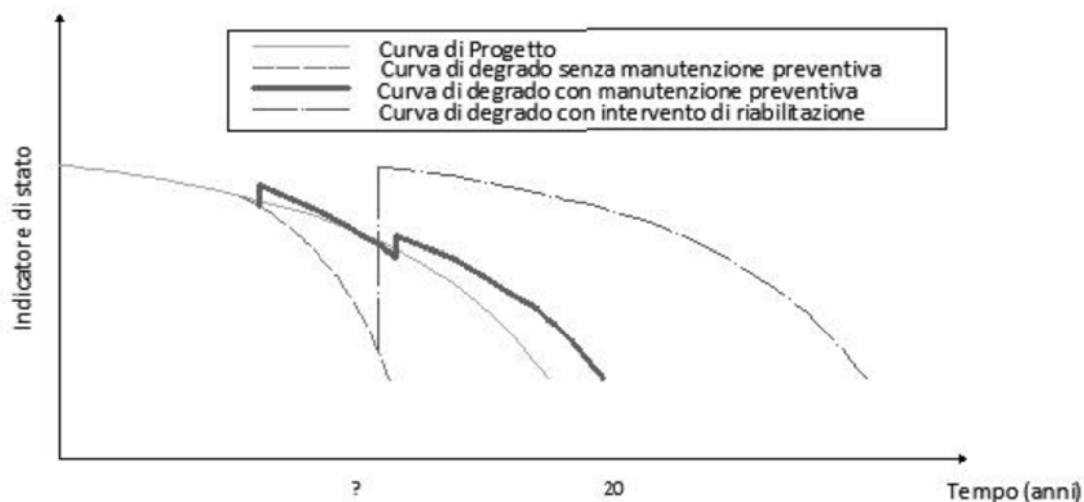


Figura 15:Esempio di curva di degrado

Lo sviluppo di modelli di degrado, specifici per il singolo aeroporto, è fondamentale per il corretto funzionamento del sistema di gestione. Esistono diversi tipi di modelli di degrado e diversi approcci che possono essere impiegati per il loro sviluppo. Le scelte in tale ambito sono condizionate da vari fattori tra cui principalmente la quantità e la qualità dei dati.

Nelle analisi che sono eseguite nell'ambito della manutenzione programmata delle pavimentazioni, la necessità di poter, in ogni istante, valutare l'effettivo stato di

ammaloramento di una sovrastruttura e quindi la sua vita utile residua rende indispensabile l'impiego di modelli di comportamento continui. Il degrado viene pertanto generalmente tenuto in conto modellando le prestazioni complessive della sovrastruttura come una funzione decrescente e convessa del tempo, dato che il danno accumulato si manifesta con maggiore intensità verso la fine del periodo di esercizio dell'infrastruttura.

## **Procedure di gestione**

L'ultimo compito del gestore aeroportuale è quello di effettuare una programmazione pluriennale degli interventi manutentivi necessari in relazione agli scenari di budget ed ai livelli di qualità delle pavimentazioni rispettivamente ipotizzati e desiderati attraverso i diversi criteri.

I criteri di definizione utilizzabili si distinguono in due tipologie:

- ♦ Priorizzazione
- ♦ Ottimizzazione

**Priorizzazione:** tramite rilievo visivo e semplici algoritmi è possibile determinare, per ogni sezione monitorata, il valore di PCI che permette di definire la lista delle priorità di intervento.

Il monitoraggio è un'attività essenziale per determinare le condizioni attuali delle pavimentazioni, e dunque per stabilire un ordine temporale per proporre al gestore le “priorità d'intervento”, cioè una lista ordinata (discendente) in funzione della condizione della pavimentazione delle sezioni della rete.

Il concetto della lista delle priorità fa riferimento a dei valori limite (minimo o massimo) oppure ad un campo di variazione, costituendo una soglia di sicurezza oltre la quale non è possibile garantire le prestazioni minime della pavimentazione. In particolare la priorizzazione, attraverso un'analisi multicriterio, definisce una lista ordinata delle sezioni in ragione della priorità di intervento (ad esempio in base al PCI o ad un indicatore di stato ed al grado di priorità dell'elemento), senza poter però pervenire ad alcuna indicazione circa la collocazione temporale ottimale dell'intervento stesso, circa la migliore tipologia di intervento sotto il profilo tecnico/economico e senza possibilità di ottimizzare il budget disponibile. Ciò nonostante, in assenza dei dati utili e necessari per poter operare tramite ottimizzazione, la

priorizzazione costituisce un valido strumento di pianificazione.

**Ottimizzazione:** l'obiettivo dell'analisi è selezionare, su un arco temporale di riferimento, la strategia migliore che dovrà essere quella che ottimizza i costi di agenzia (Agency Costs), i costi degli utenti (Users Costs) ed i costi capitali (Capital Costs).

- ♦ **Costi di Agenzia (Agency Costs):** Rientrano in questa voce tutti i costi direttamente sostenuti dall'ente gestore per l'applicazione delle soluzioni manutentive. Questi costi, sia relativi agli interventi di riqualificazione, sia relativi alle semplici operazioni di riparazione (rappezzi, sigillature dei giunti, ecc.) vengono inseriti dall'utente e devono essere tenuti costantemente aggiornati.
- ♦ **Costi Utenti (User Costs):** Possono essere i costi di operazione del veicolo che sono i costi di carburante, l'usura del pneumatico, la manutenzione di veicolo e l'ammortamento di veicolo. Questi costi possono essere quantificati dal sistema e calcolati come funzione delle caratteristiche di aderenza e di regolarità delle pavimentazioni. Le costanti relative alla quantificazione di questo danno possono essere calibrate per ciascun tipo di velivolo presente nello spettro di traffico, tenendo conto anche dello specifico tasso annuale di incremento dei movimenti di ciascun tipo di velivolo. Possono essere anche i costi degli incidenti che tengono di conto dei costi della vita umana e dei costi sanitari, il primo è costituito dalla mancata produttività, danni non patrimoniali, morali e biologici, invece il secondo rappresenta la spesa per il trattamento sanitario.
- ♦ **Costi Capitali (Capital Costs)** Il sistema di pavimentazioni relativo alle infrastrutture aeroportuali rappresenta un Capitale che le operazioni di manutenzione hanno l'obiettivo di preservare ed il cui valore può essere quantificato. L'assenza di operazioni di manutenzione provoca un progressivo degrado delle pavimentazioni e, conseguentemente, una riduzione del valore intrinseco delle pavimentazioni. All'interno del sistema APMS è necessario tenere conto che la progressiva riduzione della capacità portante delle pavimentazioni del sistema infrastrutturale genera una riduzione del Capitale che rappresenta un costo (se per assurdo si intendesse vendere un aeroporto le condizioni delle pavimentazioni e le esigenze di manutenzione entrerebbero in gioco come fattore determinante per la quantificazione del suo valore). Di questo fattore viene

opportunamente tenuto conto calcolando la riduzione del capitale come funzione della perdita di capacità portante espressa dalla riduzione di spessore equivalente (cioè lo spessore di overlay necessario per mantenere la capacità portante iniziale della pavimentazione).

Definiti i benefici ed i costi di ciascuna strategia manutentiva, la scelta degli interventi può avvenire sulla base di criteri di “ottimizzazione” attraverso i quali si seleziona la strategia, tra quelle tecnicamente ammissibili, di massima redditività.

Per poter realizzare una pianificazione ottimizzata, il gestore aeroportuale deve definire il criterio di ottimizzazione. Questa analisi delle diverse strategie manutentive e dei diversi scenari di budget, realizzata attraverso l'applicazione di algoritmi, varia in funzione degli obiettivi fissati dal gestore aeroportuale il quale può desiderare:

- ♦ Il raggiungimento ed il mantenimento di determinate condizioni delle pavimentazioni della rete (massimizzazione della prestazione) durante tutto il periodo di analisi secondo il criterio del PCI critico (PCI al di sotto del quale nessuna sezione deve arrivare; in questo caso non è garantito l'utilizzo ottimizzato del budget stanziato per la manutenzione)
- ♦ L'individuazione delle strategie manutentive che consentono l'utilizzo di tutto il budget (massimizzazione del budget) ma non sempre riescono a mantenere o a riportare la condizione di tutte le sezioni della rete al di sopra dei valori di accettabilità (scelta degli interventi in funzione delle risorse finanziarie disponibili ogni anno; il budget annuale stanziato infatti potrebbe essere: fisso per tutto il periodo di analisi, variabile di anno in anno, etc...). La massimizzazione del rapporto benefici - costi; in questo caso il beneficio è il miglioramento della condizione della pavimentazione ed il costo è quello associato alla strategia manutentiva considerata nel periodo di analisi). Grazie ai risultati scaturiti dall'analisi tecnico - economica svolta dal software adottato come strumento di supporto alle decisioni, il Post Holder Manutenzione può richiedere o meno una rivalutazione del budget annuale stanziato per la manutenzione delle infrastrutture di volo. Tale richiesta è supportata dalle analisi che dimostrano quali siano le effettive necessità della rete per lo specifico anno. Poiché il raggiungimento di determinati standard prestazionali non può avvenire a prescindere dalle risorse disponibili è opportuno che i risultati derivanti dall'analisi tecnico - economica siano noti non solo al responsabile della Manutenzione

bensi a tutti coloro ai quali vengono attribuite funzioni decisionali, di pianificazione e di spesa. L'individuazione di tali soggetti deve avvenire in funzione dell'organigramma adottato dalla Società di Gestione.

## Capitolo 2 –QUADRO DELLE NORMATIVE PER APMS

### 2.1 ICAO

L'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (in inglese International Civil Aviation Organization–ICAO) è un'agenzia autonoma delle Nazioni Unite incaricata di sviluppare i principi e le tecniche della navigazione aerea internazionale, delle rotte e degli aeroporti e promuovere la progettazione e lo sviluppo del trasporto aereo internazionale rendendolo più sicuro e ordinato.



Il Consiglio della ICAO adotta degli standard e delle raccomandazioni riguardanti la navigazione aerea e l'aviazione civile. Inoltre, l'ICAO definisce i protocolli per le indagini sugli incidenti aerei seguiti dalle Autorità per la sicurezza del trasporto dei paesi firmatari della convenzione sull'aviazione civile internazionale.

L'ICAO ha pubblicato recentemente “Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation – Volume I – Aerodrome Design and Operations” nella quinta riunione della sessione 198<sup>th</sup> il 27 febbraio 2013 che riferisce la parte della manutenzione aeroportuale per gli Autorità d'Aeroporto a livello internazionale.

In questo documento è introdotta una serie di standard e raccomandazioni pratiche per gli aeroporti. Nel decimo capitolo dove sono presentate le manutenzioni aeroportuali, è prescritto che ciascun aeroporto debba avere un programma di manutenzione, inclusa la manutenzione preventiva. Questo programma di manutenzione deve essere stabilito in un aeroporto per mantenere le infrastrutture in una condizione che non compromette la sicurezza, la regolarità o l'efficienza della navigazione aerea. Per infrastrutture si intendono gli elementi che costituiscono gli aeroporti tra cui le pavimentazioni, gli ausili visivi, le recinzioni, i sistemi di drenaggio e gli impianti elettrici ed gli edifici.

Nel paragrafo 10.2 di questo documento si parla specificamente di manutenzione della pavimentazione. Le superfici di tutte le aree di movimento comprese le pavimentazione (piste, vie di rullaggio, e piazzali) e le zone adiacenti devono essere controllate e monitorate regolarmente come parte di un programma di manutenzione preventiva e correttiva degli aeroporti con l'obiettivo di evitare ed eliminare gli eventuali oggetti sciolti / detriti che

potrebbero causare danni agli aeromobili (Foreign Object Debris-FOD).

La superficie di una pista deve essere mantenuta in una buona condizione al fine di prevenire la formazione di irregolarità. Una pista in conglomerato bituminoso la superficie deve mantenere una condizione tale da garantire le caratteristiche di attrito superficiale pari o superiore al livello minimo di attrito specificato. Queste caratteristiche di attrito superficiale per la manutenzione devono essere periodicamente misurate con la strumentazione che permette di rilevare le misurazioni in continuo. La frequenza di queste misurazioni deve essere sufficiente a determinare l'andamento delle caratteristiche di attrito superficiale della pista. Gli interventi di manutenzione correttivi sono adottati per evitare che le caratteristiche di attrito superficiale della pista scendano al di sotto di un livello minimo di attrito specificato, sia per l'intera pista che una parte di esso. Per le vie di rullaggio la superficie deve essere mantenuta in modo da essere priva di qualsiasi pietra sciolta o altri oggetti che potrebbero essere ingeriti dai motori aerei, soprattutto nel caso di aeromobile con motore a turbogetto.

Oltre a questo documento un altro documento dell'ICAO che tratta questo argomento è il Doc 9137 "Airport Service Manual, part 9 (Airport Maintenance Practices), first edition", dove si richiede l'adozione di una continua attività di monitoraggio e la realizzazione di interventi di manutenzione qualora necessario.

Però questi documenti non trattano come implementare il sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni, e non spiegano come mantenere le caratteristiche delle pavimentazioni in modo economico con il limite di budget.

Per affrontare questo argomento ci si riferisce ad altre Normative sia nazionali che comunitari.

## **2.2 EASA**

L'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (o EASA, sigla di European Aviation Safety Agency) a Colonia, in Germania è l'organo di controllo del settore aeronautico dell'Unione Europea (UE).



L'EASA assume il compito di ente responsabile della produzione e dell'adozione di tutta la Normativa di sicurezza, inclusa quella relativa alla navigazione aerea ed agli aeroporti.

Sotto la guida dell'EASA, la pubblicazione delle Normative deve seguire una procedura che assicuri la partecipazione di tutti i soggetti interessati e la trasparenza delle decisioni adottate.

A partire dal 2014 è necessario fare riferimento alle cosiddette “soft law”, “Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design-CS-ADR.DSN” e “Aerodromes Acceptable Means of Compliance and Guidance Material” pubblicate dall'EASA – European Aviation Safety Agency, le quali, costituiranno base per la certificazione del gestore aeroportuale a livello europeo.

Nella parte d'ADR.OPS.C si parla della manutenzione aeroportuale. Il gestore aeroportuale deve stabilire e attuare un programma di manutenzione, inclusa la manutenzione preventiva, per mantenere le installazioni aeroportuali in modo che siano conformi ai requisiti essenziali di cui all'allegato Va al regolamento (CE) n. 216/2008. Il campo di applicazione del programma di manutenzione deve includere anche la pavimentazione.

Il gestore aeroportuale deve anche:

- (1) effettuare la manutenzione delle superfici di tutte le aree di movimento con l'obiettivo di evitare ed eliminare qualsiasi detrito che possa causare danni agli aeromobili o mettere in pericolo il funzionamento dei sistemi di bordo;
- (2) mantenere la superficie delle piste, delle vie di rullaggio e dei piazzali al fine di prevenire la formazione di irregolarità pericolose;
- (3) intraprendere azioni di manutenzione correttiva quando le caratteristiche di attrito sia per la pista intera o una sua porzione, quando incontaminata, sono inferiori a un livello minimo di attrito. La frequenza di queste misure deve essere sufficiente a determinare l'andamento delle caratteristiche di attrito della superficie della pista.

Quindi anche l'EASA, come l'ICAO prevede nelle sue Norme che i Gestori Aeroportuali effettuino regolarmente manutenzione delle superfici aeroportuali, non sono però illustrate metodologie e strumenti per la sua attuazione.

## **2.3 America**

I primi concetti di pavement management furono introdotti nei primi anni '60 negli Stati Uniti, nel tentativo di stabilire le cause di un inatteso decadimento prematuro delle



sovrastutture stradali. Una ricerca condotta mise in evidenza l'impossibilità di stabilire un comportamento della sovrastruttura univoco, a causa delle numerose variabili locali che possono influire sullo studio.

La comunità aeronautica effettua notevoli investimenti in pavimentazioni aeroportuali. L'obiettivo principale nella progettazione e nella costruzione di queste pavimentazioni è quello di fornire adeguata capacità di carico e la buona qualità di guida necessarie per la sicurezza della navigazione aerea in tutte le condizioni atmosferiche. Subito dopo il completamento, le pavimentazioni aeroportuali iniziano un deterioramento progressivo che è influenzato dai diversi fattori. I carichi di traffico in eccesso rispetto a quelli previsti in fase di progettazione della pavimentazione possono ridurre la durata della pavimentazione in modo considerevole. Gli ammaloramenti normali nella struttura della pavimentazione risultano da gli agenti atmosferici superficiali, la fatica del materiale, e il movimento differenziale nel sottofondo sottostante per un periodo di anni. Inoltre, le tecniche di costruzione difettose, i materiali scadenti, o la scarsa manodopera possono accelerare il processo di deterioramento della pavimentazione; di conseguenza, richiedono continuamente la manutenzione ordinaria, la riabilitazione e l'aggiornamento.

Sotto questo contesto le prime indicazioni relative alla gestione delle pavimentazioni aeroportuali sono state pubblicate negli Stati Uniti attraverso la AC - Advisory Circular N° 150/5380-6 emanata dalla F.A.A. a 1983 che viene aggiornata. La ultima versione è N° 150/5380-6C del 2014.

La Federal Aviation Administration (FAA) è l'agenzia del Dipartimento dei Trasporti statunitense incaricata di regolare e sovrintendere a ogni aspetto riguardante l'aviazione civile. Creata nel 1958 come Federal Aviation Agency, assume l'attuale nome nel 1967. Insieme all'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA), è una delle due maggiori agenzie mondiali responsabili per la certificazione dei nuovi aeromobili.



Questa circolare N° 150/5380-6 fornisce le linee di guida e procedure da attuare per la manutenzione delle strutture di volo. Nella capitolo 2 “Airport pavements” è già introdotto il concetto di “Pavement Management Program (PMP)”.

Un PMP fornisce un metodo per creare un efficace sistema di manutenzione e

riabilitazione, è una procedura sistematica e coerente per pianificare la manutenzione e riabilitazione sulla base di massimizzare i benefici e minimizzare i costi. Non solo valuta la condizione attuale di una pavimentazione, ma è anche in grado di essere utilizzato per prevedere la sua condizione futura. Proiettando il tasso di degrado, il PMP può facilitare una analisi dei costi del ciclo di vita per le procedure della manutenzione/riparazione e determinare la migliore alternativa tra quelle possibili. La caratteristica principale di qualsiasi PMP è la capacità di monitorare il deterioramento della pavimentazione e determinarne le cause. Ciò richiede una procedura di valutazione oggettiva, sistematica e ripetibile. A tal fine si fa riferimento al cosiddetto Pavement Condition Index (PCI). Il PCI è un indice di valutazione della condizione superficiale di una pavimentazione e ne indica le prestazioni funzionali. Una valutazione PCI può anche fornire un'indicazione della prestazione strutturale della pavimentazione. Le determinazioni periodiche del PCI sulla stessa pavimentazione mostrano la variazione del livello delle prestazioni nel tempo. Gli aeroporti possono usare l'indagine delle condizioni della pavimentazione per svilupparne i dati sulle prestazioni. Il PCI è determinato in conformità alle procedure contenute nella norma ASTM D5340, Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys.

Per l'attuazione della AC - Advisory Circular N° 150/5380-6 (cancellato) a 1983, la FAA ha pubblicato la prima circolare (AC 150/5380-7) relativa al sistema di gestione della pavimentazione (PMS) nel 1988. Questa circolare ha presentato i concetti di PMS, discusso le componenti essenziali di tale sistema, e delinato come questo può essere utilizzato per prendere le decisioni di costo-efficacia relative alla manutenzione e riabilitazione della pavimentazione.

L'ultimo aggiornamento della Circolare è la AC 150/5380-7B del 2014. Questa circolare descrive la nozione di Airport Pavement Management Program (PMP), i suoi benefici, le sue componenti e i suoi rapporti, ect.

Le componenti di un PMP sono le seguenti:

- ♦ i database: che includono l'inventario della pavimentazione, la struttura della pavimentazione, la storia di M&R con i costi, le informazioni sulla condizione della pavimentazione, e i dati di traffico.
- ♦ Il sistema per predire la condizione attuale e futura della pavimentazione.

- ♦ Le alternative di strategia.
- ♦ La prestazione e costo della alternativa.
- ♦ la pianificazione ottimizzata di M&R per un certo di budget e i requisiti di budget per soddisfare gli obiettivi di gestione.

Per valutare la condizione delle pavimentazione si usano test di tipo non-distruttivo, riferendo la circolare AC 150/5370-11B - Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements.

Per valutare le condizioni strutturali della pavimentazione è necessario conoscere il modulo elastico e lo spessore di ogni strato della pavimentazione, come previsto dalla circolare AC 150/5320-6F-Airport Pavement Design and Evaluation. Invece la circolare AC 150/5320-12C - Measurement, Construction, and Maintenance of Skid Resistant Airport Pavement Surfaces fornisce le linee guida per la misurazione della resistenza ad attrito.

I database devono essere analizzati attraverso opportuni software. La FAA ha sviluppato PAVEAIR, un software web-based e gratuito di Airport Pavement Management System, reso disponibile dal 2011 per aiutare le organizzazioni nella valutazione, gestione e manutenzione delle loro reti di pavimentazione. PAVEAIR è progettato per soddisfare le esigenze di un sistema di gestione della pavimentazione aeroportuale (Circolare AC 150/5380-7B). Successivamente, nel 2012, è stato introdotto PAVEAIR 2.0 con la possibilità di condurre anche analisi di LCCA – Life Cycle Cost Analysis.

Altro software che può essere utilizzato è PAVER<sup>TM</sup> individuato nella circolare Advisory (AC) 150/5380-7B. PAVER<sup>TM</sup> è un'applicazione di PMP sviluppata dall' U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory in grado di:

- ♦ sviluppare ed organizzare l'inventario della pavimentazione;
- ♦ valutare la condizione attuale della pavimentazione;
- ♦ sviluppare i modelli per prevedere le condizioni future;
- ♦ relazione sulle prestazioni passate e future della pavimentazione;
- ♦ sviluppare gli scenari per M&R in base alle esigenze di budget o di condizione;
- ♦ progetti di pianificazione di M&R.

In America, grazie al maggior numero di esperienze passate, è stato possibile sviluppare e migliorare esempi di Airport Pavement Management System.

## 2.4 Canada

Oltre ad America, il Canada è uno dei primi paesi che ha studiato sistemi per la gestione delle pavimentazioni. Parallelamente agli Stati Uniti anche in Canada sono state individuate le potenzialità derivanti dalla realizzazione di Pavement Management System in ambito aeroportuale.

La definizione del Pavement Management System viene introdotta in Canada dal Roads and Transportation Association of Canada Guide [CRTAC, 1977]:

“The basic purpose of a pavement management system is to achieve the best value possible for the available funds and to provide safe, comfortable and economic transportation. This is accomplished by comparing investment alternatives both at the network and project levels, coordinating design, construction, maintenance and evaluation activities, and making efficient use of existing practices and knowledge. It, therefore, encompasses a wide spectrum of activities including the planning or programming of investments, design, construction, maintenance, and the periodic evaluation of performance”.

In altre parole, lo scopo principale di un Pavement management system è quello di ottenere la massima resa in termini di investimento economico per i fondi disponibili fornire un trasporto sicuro, confortevole ed economico. Questo si ottiene mettendo a confronto le alternative di investimento, sia a livello di rete e di progetto, coordinando le attività di progettazione, costruzione, manutenzione e valutazione, e facendo un uso efficiente delle pratiche e delle conoscenze esistenti. Quindi, comprende una vasta intervallo di attività compresa la pianificazione o programmazione degli investimenti, progettazione, costruzione e manutenzione, e la valutazione periodica delle prestazioni.

Negli ultimi 30 anni, grazie alle esperienze acquisite in questo ambito, il Canada ha elaborato un suo sistema normativo, pubblicando nel 2016 la circolare AC 302-016 -Airport Pavement Management System. Lo scopo di questo documento è quello di delineare il concetto di Airport Pavement Management System, i suoi componenti e come può essere usato per prendere le decisioni per quanto riguarda la manutenzione e riabilitazione della pavimentazione.

Le decisioni della manutenzione e restauro sono normalmente assunte in considerazione delle 5 caratteristiche principali di qualità della pavimentazione.

- ♦ Integrità strutturale: si riferisce all'integrità della superficie della pavimentazione. La superficie della pavimentazione dovrebbe essere in buone condizioni strutturali cioè strutturalmente intatta (nessun pezzo distaccato) e priva dei depositi di materiali rotti che si trovano sulla superficie, che potrebbero costituire un pericolo di FOD (Foreign Object Damage). Il FOD potenziale è da tenere in grande considerazione nella maggiore parte delle decisioni di restauro.
- ♦ Rugosità: la superficie della pavimentazione di una pista non dovrebbe avere alcuna irregolarità che crea una rugosità tale che potrebbe interferire negativamente sul funzionamento degli aeromobili, causare la perdita di attrito, causare danni strutturali dell'aeromobile stesso o disagio ai passeggeri. Per quanto riguarda questo si riferisce la circolare AC 302-023- Measurement and Evaluation of Runway Roughness.
- ♦ Attrito superficiale: la superficie della pista dovrebbe fornire un adeguato attrito superficiale e tessitura necessaria per la frenatura sicura degli aeromobili. Le variabili che influenzano la resistenza ad attrito della pista bagnata includono la profondità di tessitura, i depositi di gomma e le anomalie della pavimentazione, come le ormaie, l'asportazione di materiale e le depressioni. La guida alla misurazione, la valutazione e la manutenzione dell'attrito di superficiale della pavimentazione è fornita dalla AC 302-017-Runway Friction Measurement.
- ♦ Drenaggio superficiale: è necessario prevedere un adeguato drenaggio durante la pioggia per garantire la minimizzazione della profondità d'acqua.
- ♦ Portanza: le pavimentazioni dovrebbe essere abbastanza resistenti per sostenere i carichi degli aeromobili che sono destinate a servire. Per la capacità portante di una pavimentazione si fa riferimento alla AC 302-011-Airport Pavement Bearing Strength Reporting.

Le sue componenti principali di un APMS sono:

- ♦ Inventario tecnico delle superfici delle pavimentazioni: le superfici operative della pavimentazione dovrebbero essere incluse nell'inventario. Poi l'inventario deve essere aggiornato quando i progetti di costruzione e/o ripristino della pavimentazione sono stati completati per riflettere i cambiamenti nella dimensione, composizione strutturale e/o le

proprietà di portanza della pavimentazione.

- ♦ Indagine delle condizioni strutturali della pavimentazione: effettua le ispezioni visive delle superficie di una pavimentazione per identificare i tipi di difetti presenti e per registrare l'estensione e la gravità di tali difetti almeno una volta all'anno. Se un'indagine della condizione di una pavimentazione viene eseguita utilizzando l'indice PCI secondo la norma ASTM D5340, la frequenza dell'indagini di PCI può essere esteso a tre anni.
- ♦ Piano di gestione della pavimentazione: l'Autorità Aeroportuale dovrebbe avere un "piano di gestione della pavimentazione" per individuare gli interventi futuri di manutenzione e di restauro per mantenere tutte le aree di movimento della superficie in condizioni operative di sicurezza.

Tutti questi procedimenti vengono effettuati dal software specializzato Management System Pavement (PMS) come previsto dalla circolare, e il software deve consentire la memorizzazione delle informazioni storiche della costruzione (la storia dei costi di manutenzione, le condizioni storiche della pavimentazione etc), le informazioni della struttura, i dati di traffico e i dati dei test di tipo non-distruttivo. Le ulteriori capacità del software PMS includono la modellazione per prevedere le condizioni presenti e future, la programmazione delle campagne di ispezione e l'identificazione dei requisiti di manutenzione e riparazione.

È stato introdotto anche il programma "FAA PAVEAIR" da utilizzare per la redazione di un PMS.

## **2.5 Italia**

Dopo i primi sviluppi dell'America e il Canada, concentrati quindi essenzialmente nel continente nord-americano, il concetto del "Pavement Management" fu poi portato sul piano internazionale in occasione della conferenza sul dimensionamento strutturale delle pavimentazioni tenutasi a Londra nel 1972 (Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements). Il concetto del Pavement Management è così approdato anche in Europa, come è documentato in un rapporto pubblicato nel 1987 dall'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo sviluppo Economico) sui sistemi di gestione delle pavimentazioni (Pavement Management Systems, OECD; Paris, 1987).

Il Italia l'interesse nei confronti del Pavement Management si è sviluppato molto più tardi rispetto all'America. Le prime applicazioni sono state effettuate in ambito stradale per poi essere diffuse anche al settore aeroportuale circa all'inizio degli anni2000.

Nel 2008, ad esempio, Aeroporti di Roma (ADR) ha iniziato l'implementazione di un sistema di gestione della manutenzione programmata delle pavimentazioni sulla base dei requisiti stabiliti dalle più importanti Autorità di Aviazione Civile Internazionali (ICAO, FAA). ADR, con la collaborazione dell'Università di Pisa, della Società danese Dynatest, specializzata nella realizzazione di apparecchiature ad alto rendimento, e della GRS, specializzata in rilievi di regolarità e georeferenziazione, ha implementato un sistema di gestione delle pavimentazioni aeroportuali denominato A.I.R.P.O.R.T.S. (Airport Information Retrieval for Pavement Optimization Rehabilitation Treatment System), il quale utilizza modelli di calcolo prestazionali in grado di quantificare le condizioni di una pavimentazione, prevederne potenziali futuri problemi e suggerire la miglior strategia di manutenzione a breve, medio e lungo termine.

Sotto l'aspetto legislativo non esisteva una Normativa specifica in materia fino a 2004, anno in cui è stata pubblicata la prima bozza di circolare PMS (2004) grazie ad ENAC.

L'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) è l'autorità italiana di regolamentazione tecnica, certificazione e vigilanza nel settore dell'aviazione civile sottoposta al controllo del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.



Lo scopo della prima bozza era quello di garantire gli standard di efficienza delle sovrastrutture di volo fissati dal regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti, nonché l'ottimizzazione delle risorse economiche da destinare alla manutenzione attraverso una adeguata programmazione degli interventi, stabilizzando i criteri e le modalità con cui devono essere effettuati i controlli periodici dei parametri funzionali delle pavimentazioni delle infrastrutture di volo (aderenza-regolarità-stato superficiale), nonché le procedure per la programmazione degli interventi di manutenzione in funzione delle previsioni di decadimento di detti parametri. Questa circolare è applicabile agli aeroporti con movimento annuo complessivo di passeggeri superiore a 600.000. Preventivamente è necessario raccogliere i dati iniziale e nel ciclo di vita, creare la archiviazione informatica e la referenziazione con

coordinate geografiche.

Nel 2010 è stata stesa la seconda bozza di circolare ENAC PMS elaborata nell'ambito di una Tesi di laurea (ing. Carmine Granito – Università di Napoli). Questa seconda bozza sviluppa una proposta di nuova circolare in grado di fornire linee guida per consentire di valutare lo stato della pavimentazione delle infrastrutture di volo (runway, taxiway e apron) rispetto alle prescrizioni del regolamento e alla certificazione, e per utilizzare una metodologia per il monitoraggio e la gestione delle aree pavimentate.

Per quanto riguarda lo stato della pavimentazione vengono definiti degli indicatori di stato relativi alla funzionalità superficiale:

- ♦ misure dirette di aderenza per le piste (aderenza su bagnato con CFME secondo APT-10);
- ♦ misure indirette di aderenza per le piste (indice di macrorugosità MTD);
- ♦ misure di regolarità longitudinale (controllo sotto regoli di 3m e 45m, indici BBI e IRI, simulazioni delle sollecitazioni dell'aeromobile);
- ♦ misure di regolarità trasversale (controlli sotto regolo di 3m, indice BBI)
- ♦ valutazione delle capacità di disciplina e smaltimento delle acque (controllo pendenze e avvallamenti);
- ♦ valutazione del degrado superficiale della pavimentazione (indice PCI)

Vengono definiti anche gli indicatori di stato relativi alle caratteristiche strutturali:

- ♦ classificazione internazionale di portanza (metodo standardizzato ACN/PCN);
- ♦ calcolo della vita utile residua (calcolo razionale con software dedicati);
- ♦ verifiche di capacità di trasmissione dei carichi in corrispondenza dei giunti per le pavimentazioni in calcestruzzo (indice LTE)

Alla fine vengono introdotte le tabelle con frequenza minima con cui eseguire i controlli secondo Normativa. Le cadenze temporali sono funzione del traffico e della tipologia dell'infrastruttura.

A 2012 la terza bozza di circolare Enac-Osservatorio PMS è uscita, nella quale:

- ♦ Sono stati ridefiniti in dettaglio gli aspetti organizzativi e strumentali e il profilo dell'APMS manager;
- ♦ Si è introdotta la banca dati definendo puntualmente le categorie di dati;
- ♦ Sono state evidenziate le analisi da fare, le politiche manutentive ed è stato introdotto il



concetto di catalogo degli interventi;

- ♦ Si è introdotto il concetto di programma pluriennale di manutenzione e si sono ampliati i riferimenti normativi.
- ♦ E' dotata inoltre di appendici che approfondiscono le indicazioni relative ai dati di inventario, e quelle relative ai dati sullo stato prestazionale e strutturale della pavimentazione;

Le linee guida sull' implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni (AMPS) sono state pubblicate nel 2015, e definiscono criteri ritenuti accettabili dall'Enac per la pianificazione ed esecuzione dei controlli e della manutenzione necessaria, con gli obiettivi di istituire e mantenere un inventario delle pavimentazioni, monitorare le loro prestazioni, pianificare e programmare le attività di manutenzione e riabilitazione, e valutare l'efficacia ed i costi delle attività di manutenzione da svolgere nonché di quelle effettuate nel passato.

Queste linee guida si prefiggono le finalità di definire gli elementi , i requisiti essenziali, i benefici e i costi degli APMS e le condizioni per una loro efficace implementazione all'interno delle organizzazioni aziendali dei gestori, nell'ambito del processo di gestione delle pavimentazioni degli aeroporti certificati.

Ulteriormente vengono aggiornate le specifiche tecniche software per gli APMS nella Appendice D. È suggerito l'utilizzo di software dedicati per la gestione dell'APMS. Tale software deve essere strutturato in modo tale da prevedere:

- ♦ Database
- ♦ Risolutore

Il database deve includere le informazioni di carattere generale (General Data), le informazioni relative al traffico (Traffic Data), le informazioni relative alla struttura della pavimentazione (Structure), le informazioni relative alle caratteristiche superficiali della pavimentazione (Surface), le informazioni relative alle tipologie dei materiali, le informazioni relative alle alternative di manutenzione, le informazioni relative alle pavimentazioni rigide (PCC Jointed) ed altre informazioni (elenco di eventuali interventi manutentivi, anno di costruzione, ect.).

Il risolutore svolgerà un'analisi che potrà essere condotta a livello di Sezione Omogenea

o a livello di Rete. In entrambi i casi dovrà poter essere eseguita un'analisi tramite algoritmi costi/benefici ed è possibile utilizzare almeno due diverse tipologie di modelli prestazionali, Teorici o Empirici, ognuno dei quali interamente modificabile nei parametri da cui dipende con la possibilità di scegliere in automatico, in fase di calcolo, il modello più a favore di sicurezza.

Il software da utilizzare non è fissato, ed il Gestore è libero di scegliere il software APMS che soddisfa maggiormente i suoi requisiti.

La circolare deve essere ancora agguinata e completata. Poiché l'implementazione e l'evoluzione degli APMS e degli strumenti normativi correlati richiede un po' di anni, non è semplice.

## 2.6 Cina

Dopo l'applicazione del PMS in paesi dell'America meridionale, Canada, Nuova Zelanda, Europa, successivamente viene applicata in Cina e altri stati asiatici grazie alle nozioni acquisite dagli studiosi durante le attività svolte negli Stati Uniti.

A partire dal 2000, la Cina ha sviluppato molto rapidamente il settore dell'aviazione civile, aumentato rapidamente i movimenti, i numeri di passeggeri e le tonnellate di cargo.

Nome dell'aeroporto	Passeggeri		Cargo (Tons)		Movimenti	
	N	Anno:2000	N	Anno:2000	N	Anno:2000
<b>Totale</b>		133,693,572		3,986,609		1,756,838
Bei Jing	1	21,691,077	1	774,205	1	187,070
Guang Zhou	2	12,790,999	3	491,868	3	132,776
Shang Hai (Hong Qiao)	3	12,139,462	2	612,220	4	102,222
Shen Zhen	4	6,422,685	5	202,743	5	74,251
Kun Ming	5	5,604,090	7	125,034	6	68,642
Shang Hai (Pu Dong)	6	5,543,667	4	266,682	8	58,306
Cheng Du	7	5,524,709	6	158,635	7	58,614
Hai Kou	8	4,362,743	13	71,064	9	56,767
Xi An	9	3,878,988	9	76,445	10	51,473
Xia Men	10	3,551,531	8	99,484	11	44,505

Figura 16: Statistiche dei primi 10 aeroporti nel 2000

	Passengeri				Cargo (Tons)				Movimenti			
Nome dell'aeroporto	N	01/01/2015-31/12/2015	01/01/2014-31/12/2014	%	N	01/01/2015-31/12/2015	01/01/2014-31/12/2014	%	N	01/01/2015-31/12/2015	01/01/2014-31/12/2014	%
<b>Totale</b>		<b>914,773,311</b>	<b>831,533,051</b>	<b>10.0</b>		<b>14,094,003</b>	<b>13,560,841.0</b>	<b>3.9</b>		<b>8,565,526</b>	<b>7,933,110</b>	<b>8.0</b>
BeiJing	1	89,939,049	86,128,313	4.4	2	1,889,439.5	1848251.5	2.2	1	590,199	581,952	1.4
Shang Hai (Pu Dong)	2	60,098,073	51,687,894	16.3	1	3,275,231.1	3,181,654	2.9	2	449,171	402,105.0	11.7
Guang Zhou	3	55,201,915	54,780,346	0.8	3	1,537,758.9	1,454,044	5.8	3	409,679	412,210.0	-0.6
Cheng DU	4	42,239,468	37,675,232	12.1	5	556,552.1	545,011	2.1	6	293,643	270,054.0	8.7
Chen Zhen	5	39,721,619	36,272,701	9.5	4	1,013,690.5	963,871	5.2	4	305,461	286,346.0	6.7
Shang Hai (Hong Qiao)	6	39,090,865	37,971,135	2.9	6	433,600.1	432,176	0.3	8	256,603	253,325.0	1.3
Kun Ming	7	37,523,098	32,230,883	16.4	9	355,422.8	316,672	12.2	5	300,406	270,529.0	11.0
XI An	8	32,970,215	29,260,755	12.7	14	211,591.5	186,413	13.5	7	267,102	245,971.0	8.6
Chong Qing	9	32,402,196	29,264,363	10.7	11	318,781.5	302,336	5.4	9	255,414	238,085.0	7.3
HangZhou	10	28,354,435	25,525,862	11.1	7	424,932.7	398,558	6.6	10	232,079	213,268.0	8.8

Figura 17: Statistiche dei primi 10 aeroporti nel 2014 e 2015

Allo stato attuale, in Cina sono presenti più di 200 aeroporti civili, tra cui ci sono vecchi aeroporti che sono utilizzati da lungo termine ed aeroporti di nuova costruzione. A causa dei bruschi aumenti dei movimenti aeroportuali, le prestazioni delle pavimentazioni decadono estremamente velocemente rispetto al caso in cui non si verificano incrementi di traffico. Di conseguenza aumentano i costi di esercizio, diminuisce il comfort dei passeggeri e lo stato di avanzato degrado della pavimentazione può causare problemi di sicurezza.

Pian piano gli Enti Gestori degli aeroporti cinesi hanno iniziato di rendersi conto di queste cose, concentrando i loro sforzi per studiare i problemi e fenomeni della pavimentazione, per sviluppare un programma di manutenzione della pavimentazione in modo economico e ragionevole, al fine di mantenere le buone condizioni della pavimentazione. A causa delle diverse specifiche tecniche, modelli di progettazione, attrezzature per l'esecuzione di test e modelli di gestione, in Cina non sono stati importati direttamente i sistemi per migliorare la strategia di M&R sviluppati dalla FAA.

Nel 2004 l'Autorità d'Aeroporto Shang Hai (Hong Qiao) ha iniziato a implementare il suo Airport Pavement Management System (SHAPMS) che è stato sviluppato dal Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shang Hai, Civil Aviation Administration of Eastern China e Shang Hai Airport Group Ltd, basandosi sulla procedura della valutazione e analisi della pavimentazione, GIS e sulla

tecnologia della gestione della informazione (IMT).

Questo sistema SHAPMS ha 5 sottosistemi:

- ♦ Il modulo di gestione delle informazioni
- ♦ Il modulo d'ispezione e valutazione prestazionale della pavimentazione
- ♦ Il modulo GIS
- ♦ Il modulo di processo decisionale
- ♦ Il modulo di gestione dei network dati

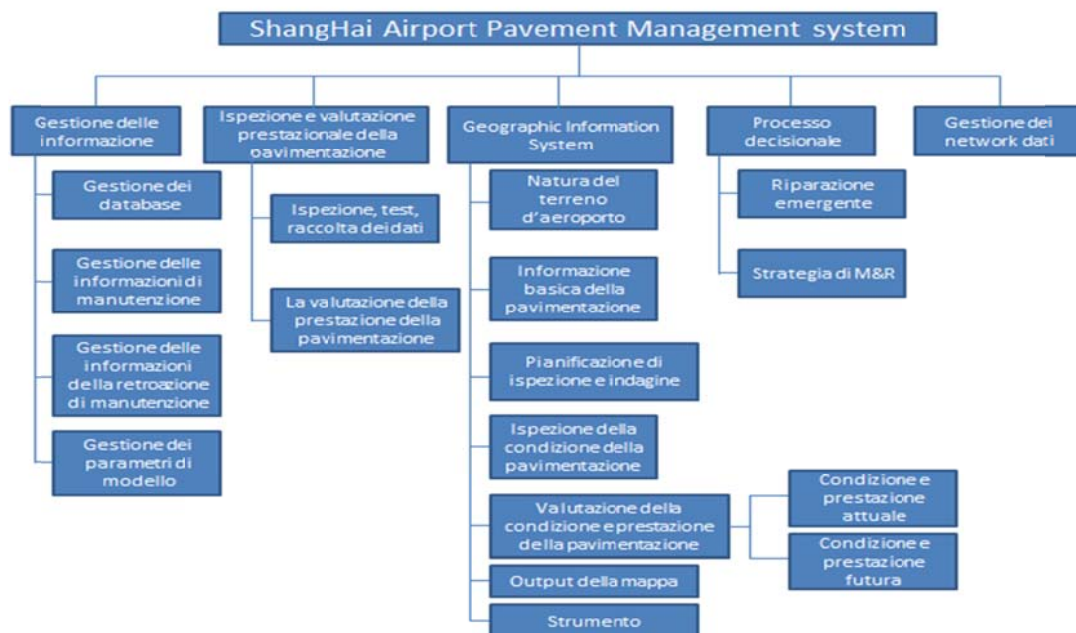


Figura 18: Funzionalità dei moduli nello SHAPMS

Lo SHAPMS è in grado di supportare l'ispezione quotidiana della pavimentazione e la riparazione emergente, l'ispezione periodica, il processo decisionale della manutenzione e riabilitazione, la gestione delle informazioni della pavimentazione, ect. In generale, il sistema si propone di aiutare le Autorità Aeroportuali di ShangHai a migliorare gli interi processi decisionali coinvolti nella gestione delle pavimentazioni aeroportuali, supportandoli dall'ispezione e dal test della prestazione funzionale, all'analisi e valutazione della manutenzione necessaria e delle caratteristiche strutturali, oltre alla selezione e ottimizzazione dei funzionamenti della pavimentazione e le contromisure della manutenzione.

La procedura di valutazione della pavimentazione tiene in considerazione la sicurezza e le proprietà funzionali e strutturali della pavimentazione. Quindi dovrebbe includere lo stato attuale di deterioramento della pavimentazione, la capacità portante della struttura, la

resistenza ad attrito, la rugosità e la capacità di drenaggio. Vengono quindi definiti gli indicatori relativi a questi 5 aspetti.

Categoria delle prestazioni	Indicatore della valutazione
lo stato di deterioramenti della pavimentazione	Condition Pavement Index (PCI)
	Broken Slab Ratio(BSR)/Craking Ratio(CR)
	Tipo di ammaloramento
	Tasso di deterioramenti dei rappezzi
la capacità portante delle struttura	Basin of deflection
	Load transfer efficiency at joint
	Voids Beneath Slabs-on-Ground
	Pavement Structure Parameters
	ACN-PCN
	Pavement Remaining Life
la resistenza ad attrito	Skid-Resistance
	Distribution of Skid-Resistance
la rugosità	International Roughness Index (IRI)
	Distribution of IRI
la capacità di drenaggio	Slope Transversal
	Slope Longitudinal

Figura 19:Indicatori della valutazione nello SHAPMS

La previsione dell'evoluzione delle condizioni della pavimentazione è molto utile ed essenziale per la gestione della pavimentazione, e permette di prevedere la prestazione, funzionale e strutturale, rimanente durante la vita utile residua. Per le pavimentazioni in conglomerato bituminoso (flessibili) e per le pavimentazioni in calcestruzzo (rigide) esistono modelli differenti per prevedere le prestazioni rimanenti in termini di prestazioni strutturali, mentre per quanto riguarda le condizioni funzionali in entrambi i casi il modello si basa sul valore del PCI.

Lo SHAPMS deve avere le seguenti capacità:

- ♦ Coprire l'intero processo di gestione della pavimentazione, soddisfare i diversi livelli di gestione (la riparazione degli ammaloramenti emersi dall'ispezione quotidiana, la riabilitazione ordinaria e la manutenzione preventiva, la valutazione delle condizioni attuali e la pianificazione di M&R, oltre alla previsione della condizione futura attraverso le ispezioni e test periodici).
- ♦ Raccogliere e gestire i dati della pavimentazione.
- ♦ Potere visualizzare le informazione base della pavimentazione, la valutazione e il programma della manutenzione nella mappa, basandosi sul GIS.
- ♦ Potere di impostare e aggiornare i parametri del modello e i dati.

Lo SHAPMS è stato usato con un grande successo presso l'aeroporto di ShangHai /

Hong Qiao, l'ottimizzazione del programma di manutenzione ha permesso notevoli benefici economici e sociali.

Grazie al grande successo dello SHAPMS e l'ampia esperienza acquisita presso l'aeroporto di ShangHai / Hong Qiao, l'amministrazione dell'aviazione civile della Cina (Civil Aviation Administration of China-CAAC) ha pubblicato la circolare MH/T5024 - "Technical Specifications of Aerodrome e Pavement Evaluation and Management" del 2009 per normalizzare e unificare le tecniche e i metodi di applicazione della valutazione e gestione della pavimentazione aeroportuali e i processi della implementazione di un'AMPS, come supporto per le Autorità Aeroportuali cinesi.

Questa circolare include la gestione dei dati tecnici, l'ispezione e valutazione dello stato di deterioramento della pavimentazione, la prova e valutazione delle prestazioni strutturali e funzionali, la previsione della vita rimanente, le contromisure della gestione e manutenzione della pavimentazione. ecc, tutte le prove e ispezioni devono essere riferite dalla circolare MH/T5110-"In-situ measurement specification for pavement and subgrade of civil airports"

Per il software d'APMS, la circolare consiglia che ogni Autorità Aeroportuale cinese sviluppi un suo software opportunamente calibrato e che si basi sul GIS, è possibile anche l'utilizzo di software come PAVER della FAA o AIRPORTS della DYNATEST.

La circolare deve essere aggiornata e completata mediante nuove esperienze e ricerche.

## Capitolo 3 – A.I.R.P.O.R.T.S.

### 3.1 Introduzione

Analizzare i database al fine di quantificare la condizione della pavimentazione attuale, anticipare i problemi futuri, selezionare e programmare le migliori strategie di manutenzione e riabilitazione a breve e lungo termine è il compito essenziale dell'AMPS. Tutti questi procedimenti possono essere elaborati automaticamente avvalendosi del programma in modo affidabile. Sul mercato esistono diversi famosi software.

Per gestire tutta la rete aeroportuale si può usare ad esempio A.I.R.P.O.R.T.S. (Airport Information Retrieval for Pavement Optimization Rehabilitation Treatment System), software sviluppato dal Dynatest.

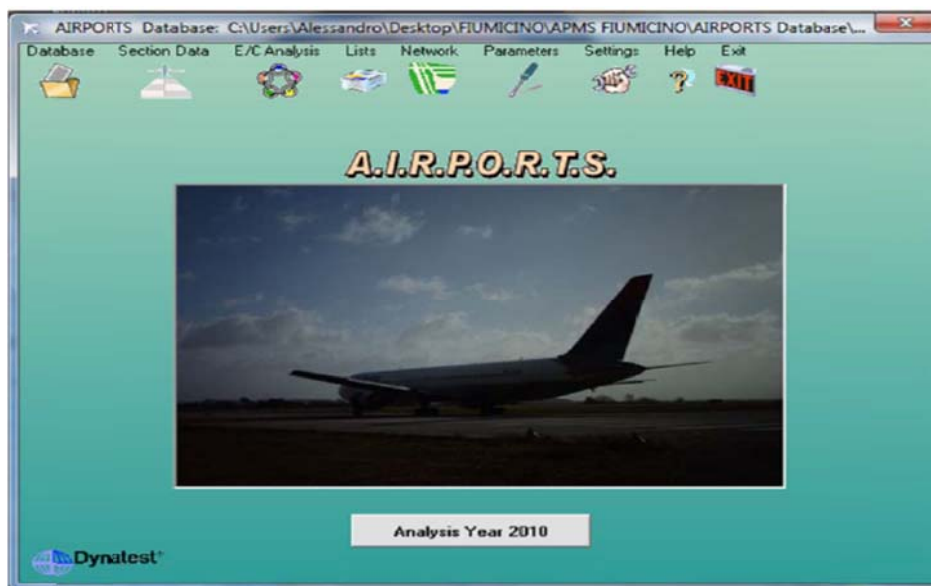


Figura 20: Software A.I.R.P.O.R.T.S.

Il cuore dell'AIRPORTS è il modello PESR (Performance Economic Rating System).

Esistono tre componenti fondamentali del software AIRPORTS:

- ♦ Modelli per determinare le prestazioni della pavimentazione, basati sui principi meccanici;
- ♦ Modelli per quantificare gli effetti sulle condizioni delle pavimentazioni
- ♦ Metodi per selezionare le ottime combinazioni di M&R durante il ciclo di vita della pavimentazione (ottimizzazione)

AIRPORTS può essere utilizzato a livello di progetto per calcolare gli effetti delle diverse strategie di M&R in una sezione, e valutare il tipo di intervento da mettere in atto sulla base

dello stato conservativo, le specifiche dei materiali da utilizzare. AIRPORTS può anche essere utilizzato a livello di rete per determinare le strategie di M&R su una serie di sezioni e le ottime combinazioni per un certo livello di budget durante il ciclo di vita della pavimentazione (Life Cycle Costs Analysis).

AIRPORTS è caratterizzato da un approccio di tipo “proattivo” , utilizzando i tassi di deterioramento della pavimentazione e altri dati effettivi come i parametri per calibrare il modello. AIRPORTS riporta i costi della proposta di M & R. I costi unitari possono essere sovrascritti dall'utente per adattarsi alla situazione locale, per consentire quindi l'ottimizzazione delle decisioni.

### 3.2 Inventario

La rete infrastrutturale dell'aeroporto è costituita da “rami” e “sezioni”. Il ramo si suddivide in una o più sezioni omogenee. La sezione è la più piccola unità gestionale che viene considerata per i trattamenti di M&R. I fattori da considerare per dividere i rami nelle sezioni sono la struttura della pavimentazione, il traffico, la storia della costruzione e la condizione della pavimentazione. L'inventario deve essere preparato prima delle indagini condizionali da effettuare.

Un importante vantaggio dell'AMPS è la capacità sia per determinare le condizioni attuali strutturali e funzionali della rete che per predire le condizioni future.

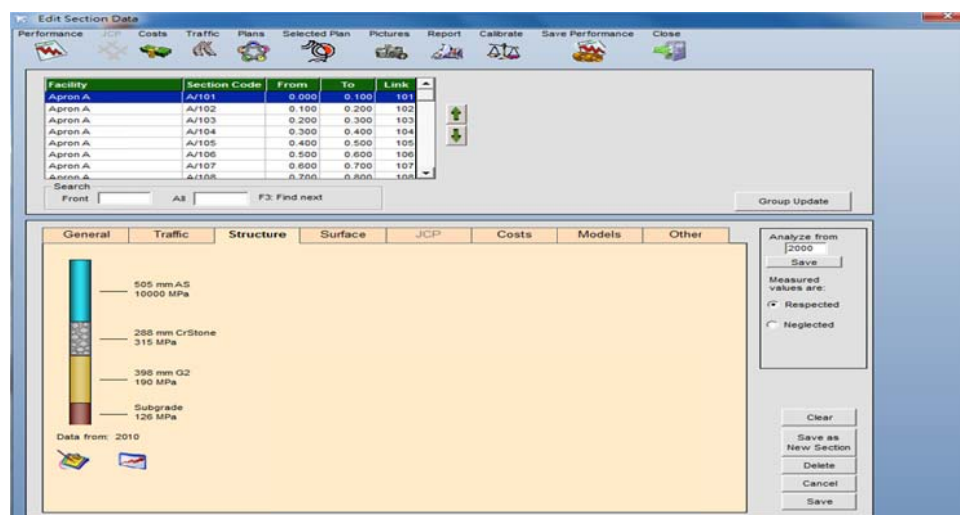


Figura 21:Esempio di Ramo e Sezione

### 3.3 Modelli di prestazione dei materiali



Sotto le influenze del tempo, del carico e dell'effetto climatico i materiali e la struttura della pavimentazione possono deteriorarsi. Gli sforzi causati dal passaggio dell'aeroplano risultano le microfessure nel conglomerato bituminoso o misto cementato, provocano inoltre la deformazione permanente nei strati della pavimentazione. Gli aggregati nello strato superficiale possono essere levigati dal pneumatico e le tessiture possono essere modificate dalle depressioni degli aggregati, depositi delle gomme; tutti questi fattori possono provocare il decremento della resistenza all'attrito e comportano il decremento delle prestazioni della pavimentazione.

Col tempo, le microfessure possono portare alla formazione di macrofessure. Questo può provocare le penetrazioni dell'acqua nelle pavimentazioni, diminuendo le resistenze dei materiali, accelerando il deterioramento della pavimentazione.

I processi di deterioramento del materiale e di sviluppo della deformazione permanente sono complessi ed estremamente difficili da modellare. Per modellare il processo di deterioramento durante il tempo, tante semplificazioni devono essere fatte, ed è anche necessario basarsi sulle relazioni empiriche. Trascurare il processo fisico di deterioramento e basarsi sui metodi statistici, non è soddisfacente dal punto di vista ingegneristico. I modelli prestazionali sviluppati usando la tecnica regressionale senza nessuna considerazione del comportamento meccanico di deterioramento, forse sono soddisfacenti per predire l'andamento delle condizioni a livello di rete, però non sono collegati alle proprietà ingegneristiche usate invece per descrivere le condizioni della pavimentazione a livello di progetto.

I modelli di deterioramento possono essere definiti per ogni tipo di materiale specifico.

Parameters

Select setup to edit: Standard

Standard

Material Types Alternatives Repairs Cost Models Limits & Models

Select material: AC, AG, AS, C1, C2, C3, C4, Concrete, CrStone, ETB, Fogaspray, etc.

Create new material Delete current material

Material Name: AC Material type: Bituminous Ref. modulus: 3600 MPa Min. modulus: 500 MPa Hatch: [Hatch icon]

Seasonal Factors: 1 Std. dev. factor: 1.2 Poissons ratio: 0.35

Modulus, IRI and Rut Friction Ageing and Water

$$Damage = A \cdot \left[ \frac{N}{10^6} + \left( \frac{RT}{R_{ref}} \right)^{k1} + \left( \frac{E}{E_{ref}} \right)^{k2} \right]^{k3}$$

	A	RT	Rref	Eref (MPa)	k1	k2	k3
Damage dE/E0	.5	Strain	268	3000	.5	5.29	1
IRI	1	Strain	1350	160	0	4	1
Rut	1	Strain	885	160	0	4	1

Ref in MPa for stress and uS for strain

Save as new permanent Setup Delete Cancel Save as new Setup Save Setup

Figura 22:Modello di materiale

### 3.4 Previsione delle prestazioni della pavimentazione

AIRPORTS utilizza per le previsioni di deterioramento della pavimentazione dei modelli recursivi-incrementali combinati con le risposte meccanicistiche delle pavimentazioni in termini di tensioni e deformazioni, per ogni interfaccia degli strati. Questo metodo è basato sulla divisione della vita utile in una stagione o un anno. All'inizio di ogni incremento di tempo la condizione attuale è usata come input per calcolare il danno durante l'incremento di tempo, considerando gli effetti del traffico. La nuova condizione può poi essere utilizzata come un input per il successivo incremento di tempo. Usando la relazione empirica per predire il danno, la condizione terminale è prevista come una funzione del numero totale di carichi ripetibili durante il periodo. I parametri della relazione empirica sono le condizioni attuali in termine di strain/stress e modulo elastico come espresse:

$$N = a * strain^b * E^c$$

N=numero di carichi ripetibili che causano il danno

E=modulo elastico del materiale

a,b,c sono i costanti calibrate per il materiale specifico sotto le condizioni locali (caratteristiche climatiche e traffico)

Nell'APMS la programmazione delle attività è importante al fine di minimizzare il costo totale. Non è realistico operare con modelli lineari, è più ragionevole assumere invece che il decremento di modulo elastico a fatica del materiale sia funzione non-lineare del numero di carichi che interessano la pavimentazione:

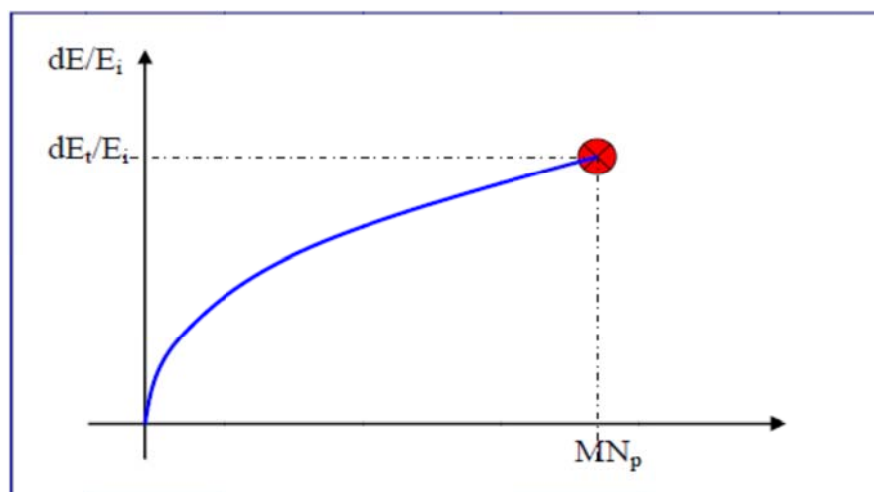


Figura 23:Modello non-lineare tra il decadimento di modulo elastico e  $MN_p$

MNp è il numero dei passaggi ammissibili di carico, Ei è il modulo elastico iniziale e dE è l'incremento di modulo. La funzione del danno può essere espressa come:

$$Damage = A * \left[ \frac{N}{10^6} * \left\{ \frac{RT}{Rref} * \left( \frac{E}{Eref} \right)^{K1} \right\}^{K2} \right]^{K3}$$

Con AIRPORTS i decrementi di modulo, rugosità e ormarie possono essere inseriti nel modello per ogni tipo di materiale definito dall'utente. A, Rref, Eref, k1, k2, k3 sono i costanti definite dall'utente. RT è il tipo della risposta, può essere la tensione o la deformazione. Rref è il riferimento della risposta, e Eref è il riferimento del modulo. Durante la analisi AIRPORTS calcola la previsione di danno per ogni strato, poi combina tutti i danni per predire la prestazione nel tempo della sovrastruttura. È anche possibile calibrare i modelli per predire gli altri tipi di condizione. Tutti i modelli meccanici sono basati sui moduli elastici, questi moduli elastici sono ricavati spesso dal backcalculation della deflessione misurata dal Heavy Weight Deflectometer (HWD).

I tipi di danno possono essere considerati:

- ♦ Deterioramento strutturale basato sul decremento di modulo del conglomerato bituminoso o misto cementato
- ♦ Ormaie, rugosità e aderenza

### 3.5 Alternative di M&R

La previsione della prestazione può essere usata per vedere l'effetto di M&R durante il periodo d'analisi, il programma può anche fare un'analisi delle sezioni al fine di individuare la migliore pianificazione di M&R, basandosi sul database di alternative di M&R utilizzabili.

### 3.6 Ottimizzazione

Quando viene effettuato M&R della sezione per tutta la rete, è possibile generare un completa pianificazione di M&R usando gli algoritmi di ottimizzazione. Gli algoritmi di ottimizzazione economica per la definizione della priorità degli interventi manutentivi potranno essere:

#### **Cheapest: (soluzione più economica)**

Questa strategia non tiene conto delle informazioni relative ai budget disponibili ed ai costi dell'utenza, individuando la soluzione più economica per l'Agenzia calcolata sul periodo di

analisi. In altri termini vengono minimizzati i costi direttamente sostenuti dall'Agenzia, indipendentemente dai Capital Costs e dagli User Costs. Questa strategia non rappresenta una vera e propria ottimizzazione del procedimento a livello di rete ma più semplicemente l'individuazione soluzione più economica che compete a ciascuna sezione appartenente alla rete.

#### **Decrement:(criterio decrementale)**

Questo metodo individua un piano di manutenzione caratterizzato dal minimo valore per i costi complessivi, includendo Agency Costs, User Costs e Capital Costs. In molti casi è lecito attendersi che il risultato non soddisfi i limiti imposti dalla disponibilità di budget per qualcuno degli anni del periodo di analisi. In questi casi viene pertanto utilizzato un algoritmo basato sul metodo degli "effective gradient" di Toyoda, con l'obiettivo di ricercare quella soluzione che determina i minori costi complessivi, nel rispetto dei vincoli imposti ai valori annuali di budget minori.

#### **Increment: (criterio incrementale)**

Questo metodo è simile a quello "Decrement" ma individua il piano di manutenzione che risulta il meno costoso per l'Agenzia (come avviene con il Cheapest), indipendentemente dai Capital e User costs. A causa della natura "euristica" del problema la procedura Incrementale porterà generalmente ad una soluzione diversa da quella che si ottiene con quella Decrementale.

#### **Genetic :(criterio genetico)**

Questo metodo di ottimizzazione utilizza un algoritmo genetico per applicare miglioramenti ad una soluzione esistente, ottenuta con uno dei precedenti algoritmi. Con questa procedura viene utilizzato un algoritmo genetico per ricercare la soluzione che minimizza la differenza tra il procedura Decrement e successivamente viene valutata la possibilità di migliorarla con algoritmo Genetic. E' possibile utilizzare il codice Genetic anche per ottimizzare soluzioni valutate con i metodi Increment o Cheapest.

#### **Fit Budget: (rispetta i vincoli di budget)**

Con questa procedura viene utilizzato un algoritmo genetico per ricercare la soluzione che minimizza la differenza tra il budget disponibile ed i costi calcolati per le attività di manutenzione e riabilitazione per tutti gli anni del periodo di analisi.

L'obiettivo di minimizzare le differenze di budget (richiesto e disponibile) viene combinato con quello di minimizzare i costi totali. All'interno di questa procedura è possibile scegliere il peso da assegnare a ciascuno di questi due obiettivi oltre che il modo di valutazione delle differenze di budget.

**Completed**

	Budget	Remaining budget
2007	2500	-107035
2008	2500	-1
2009	2500	0
2010	2500	-1
2011	2500	-861
2012	2500	2500
2013	2500	2500
2014	2500	697
2015	2500	422
2016	2500	140
2017	2500	-90059
2018	2500	-231
2019	2500	-180
2020	2500	-125
2021	2500	-5
2022	2500	2500
2023	2500	2500
2024	2500	697
2025	2500	422
2026	2500	140
2027		
2028		
2029		
2030		
2031		
2032		
2033		
2034		
2035		
2036		

**Settings**

No deficit first: ☐ Max tries: 10000 Parents: 40  
 20 years  
 Include:  
☐ All sections with E/C analysis done  
☒ Only sections within current section group  
 Display amounts in: ☐ Millions RM ☒ Thousands RM  
 Number of decimals: 0

**Run Optimizations**

**Cheapest**  
**Decrement**  
**Increment**  
**Genetic**  
**Fit budget**

☐ RMS  
 Weight: 1

**Results**

User costs: 0  
 Agency costs: 175715  
 Capital costs: -30384  
 Total costs: 145332  
 Remaining total: -185978  
 Budget difference, plus: 12519  
 Budget difference, minus: -198497

Save budget Save summary

Figura 24: Procedura di ottimizzazione

## **Capitolo 4 – ELMOD 6**

### **4.1 Introduzione**

ELMOD 6 (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) è il più avanzato programma sviluppato da Dynatest per analizzare le pavimentazioni, utilizzando le più recenti ricerche fornite dal Heavy Vehicle Simulator (HVS) e basandosi su 35 anni di esperienza di consulenza in tutto il mondo. Questo programma permette di valutare i moduli degli strati basandosi sui valori di deflessione registrati, del carico, dello spessore degli strati (il programma può operare con un modello a 2, 3 o 4 strati) e modellare la prestazione della pavimentazione e controllare le operazioni del FWD, è molto pratico, veloce e facile da usare.

ELMOD 6 analizza la risposta della pavimentazione grazie ai dati di deflessione ottenuti mediante FWD e HWD determinando il modulo elastico, la deformazione e la tensione di ogni strato significativo. Come per lo studio delle strutture civili anche l'analisi della pavimentazione viene effettuata attraverso l'uso delle tensioni ammissibili e delle deformazioni in punti critici all'interno della struttura della pavimentazione, sotto carico. La relazione tra la tensione ammissibile, la deformazione e gli ammaloramenti della pavimentazione rimane essenzialmente empirica. Il calcolo delle tensioni e deformazioni all'interno della struttura della pavimentazione può essere realizzato attraverso un approccio analitico o meccanicistico.

Il software ELMOD è inoltre in grado di individuare lo strato critico e la vita utile residua della pavimentazione utilizzando il modulo LCCA (Life-Cycle Cost Analysis) che permette all'utente di selezionare e decidere le alternative di manutenzione & riabilitazione ottimali per una frazione dell'aeroporto come il ramo oppure la sezione.

Obiettivo della presente Tesi è, attraverso l'utilizzo di ELMOD, andare ad analizzare pavimentazioni di sezioni aeroportuali per individuare le possibili alternative di M&R, facendo riferimento ad un solo parametro strutturale della pavimentazione (tipo E), mentre invece AIRPORTS utilizza più parametri.

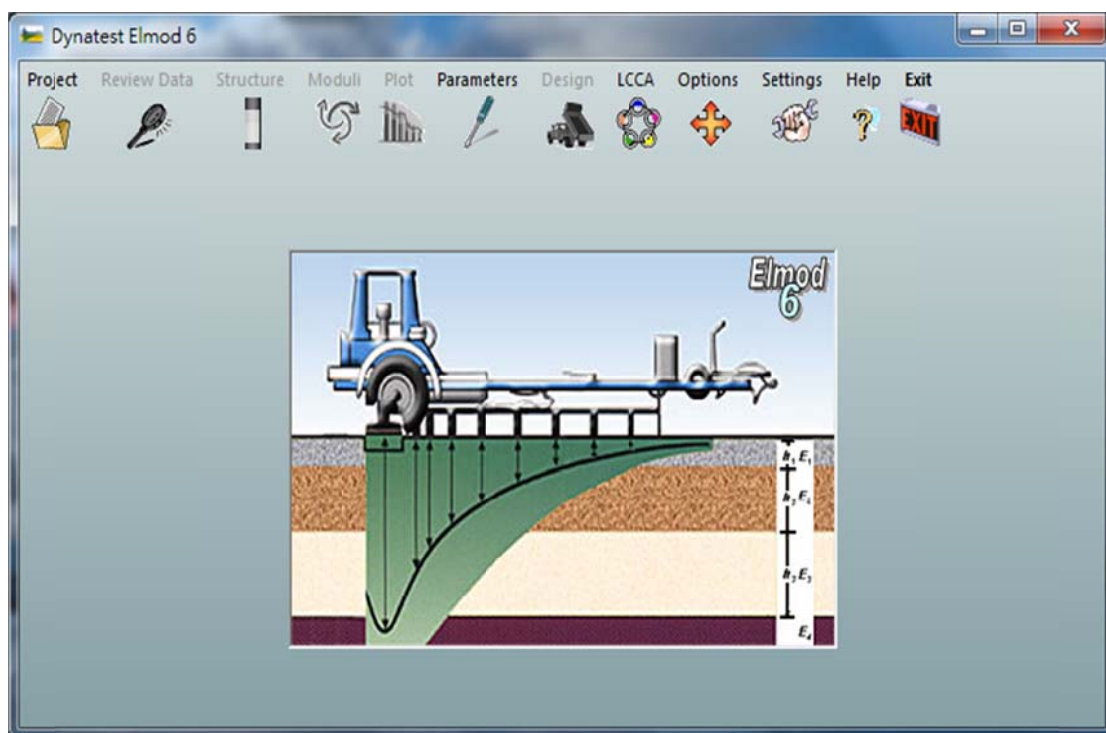


Figura 25: Interfaccia del software ELMOD 6

## 4.2 Benefici di ELMOD 6

I benefici del programma possono essere distinti in 2 tipi, in accordo con due diversi punti di vista:

I benefici da punto di vista economico:

- ♦ Effettua le analisi rapidamente.
- ♦ Può essere utilizzato per determinare le ottimali alternative di M&R.
- ♦ Può considerare anche nuovi materiali innovativi, valutando anche le condizioni ambientali.
- ♦ Determina gli effetti dei sovraccarichi, permettendo di determinare i costi della riabilitazione aggiuntiva.

I benefici da punto di vista ingegneristico:

- ♦ Utilizza la tecnica dell'analisi meccanica-empirica che funziona sulla ampia varietà di tipi di pavimentazioni, di carico, delle condizioni ambientali locali.
- ♦ I documenti dei parametri possono essere facilmente impostati con il materiale locale, il carico e le opzioni di riabilitazione.
- ♦ Determina i moduli, le forze e gli sforzi fino a 5 strati.

- ♦ Integra il programma ELMOD con metodi di calcolo FEM/LET/MET, (Metodo degli Elementi Finiti, Teoria della Linea Elastica e Metodo degli Spessori Equivalenti).
- ♦ Il modulo LCCA permette all'utente di confrontare più scenari di riabilitazione per un periodo di 20-25 anni. Il modello della pavimentazione si basa su la rugosità, l'attrito e l'ammaloramento della pavimentazione, come per l'analisi strutturale.
- ♦ Il modulo PCN è usato per valutare la resistenza della pavimentazione aeroportuale, basandosi sui risultati della procedura di backcalculation di ELMOD.

#### **4.3 Vantaggi di ELMOD 6**

ELMOD ha i seguenti vantaggi:

- ♦ Può funzionare sia per la pavimentazione stradale sia per la pavimentazione aeroportuale.
- ♦ Consente all'utente di modificare manualmente i moduli degli strati (o altri parametri), e confrontare l'effetto sulle deflessioni calcolate rispetto alle deflessioni misurate.
- ♦ Con FEM (Finite Element Module) tutti gli strati possono essere trattati come non lineari elastici, e con MET (Method of Equivalent Thicknesses) il sottofondo può essere non lineare elastico.
- ♦ Utilizza dei metodi di analisi di tipo recursivo-incrementale, che si basano sull'approccio della nuova guida della progettazione AASHTO 2002.
- ♦ Il programma ha la capacità di includere nella modellazione anche i dati prestazionali come la rugosità, la profondità della ormaia, l'attrito e le ispezioni visive,.
- ♦ I modelli di prestazione e i modelli di costo sono regolabili dall'utente, e possono essere calibrati in relazione a condizioni specifiche.
- ♦ Obiettivamente seleziona la soluzione ottimale di riabilitazione e manutenzione per la sezione oggetto d'indagine.
- ♦ Calcola le migliori strategie di manutenzione per la sezione, basando sulla ottimizzazione dei costi / benefici.
- ♦ L'utente è in grado di modificare tutte le funzioni di danno per ogni materiale definito.
- ♦ Il software ha un numero illimitato di alternative di riabilitazione che può essere aggiunto dall'utente.
- ♦ È possibile inserire qualsiasi alternativa dalle sigillature superficiali e i semplici overlays



per riciclare e ricostituire.

Con tutti questi notevoli vantaggi, il programma può effettuare la analisi dei dati di FWD, la modellazione della prestazione della pavimentazione e l'ottimizzazione delle alternative di M&R in modo veloce e affidabile.

#### **4.4 Moduli di ELMOD 6**

ELMOD effettua tutte le sue funzioni attraverso 3 moduli principali per valutare le caratteristiche strutturali della pavimentazione e ottimizzare le strategie di manutenzione e riabilizzazione.

I moduli sono i seguenti:

- ♦ Il modulo FEM/LET/MET

Il modulo FEM (Finite Element Module) utilizza un programma ad elementi finiti assialmente simmetrici che è sviluppato da Wilson di University of California. Il modulo LET ( Linear Elastic Theory) usa il programma Waterways Experiment Station's program (WESLEA), e MET (Method of Equivalent Thicknesses) è simile al metodo utilizzato nell'opzione "Basin fit" di ELMOD con un uso più semplice di fattori di correzione.

Con questi moduli si può fare il confronto degli effetti sulle deflessioni calcolati rispetto alle deflessioni misurate, al fine di determinare i moduli degli strati, attraverso la cosiddetta backcalculation, però non è possibile calcolare la vita utile residua della pavimentazione o la progettazione di un overlay. Il modulo calcolato con queste opzioni è sotto alle condizioni convenzionali di prova senza nessuna correzione della temperatura o dell'effetto stagionale. Quindi le temperature non vengono controllate. Il programma può, tuttavia, essere utilizzato per calcolare le tensioni e deformazioni sotto un singolo carico dell'aeroplano. Se tutti i punti di una sezione vengono valutati utilizzando l'opzione "Fit all points", i moduli verranno memorizzati nel database e possono essere utilizzati per il calcolo della vita residua e la progettazione dell'overlay necessari.

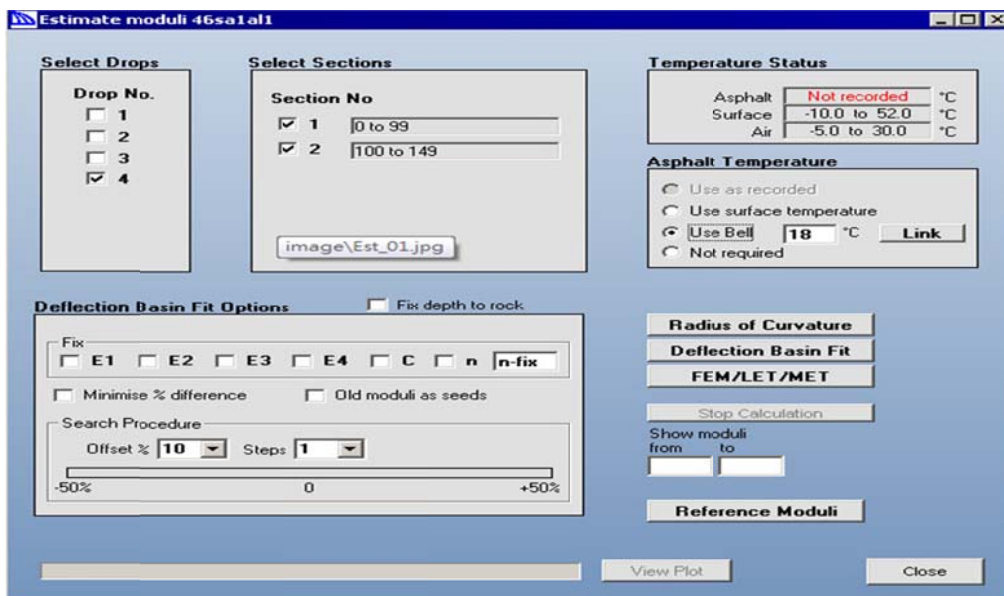


Figura 26:Esempio estimazione del modulo

♦ Il modulo LCCA

Il modulo LCCA (Life Cycle Cost Analysis) permette di selezionare l'ottimale alternativa di manutenzione e riabilitazione per la sezione della pavimentazione all'utente. I principali inputs sono i risultati dal backcalculation per il modulo LCCA. Il programma esegue un'analisi costo del ciclo di vita per ogni opzione di manutenzione, e organizza le soluzioni secondo i rapporti costi/benefici. Questo modulo tiene conto

anche delle condizioni delle pavimentazioni (rugosità, ormaie, aderenze, ispezioni visive), al fine di calibrare il modello di prestazione e il modello di costo.

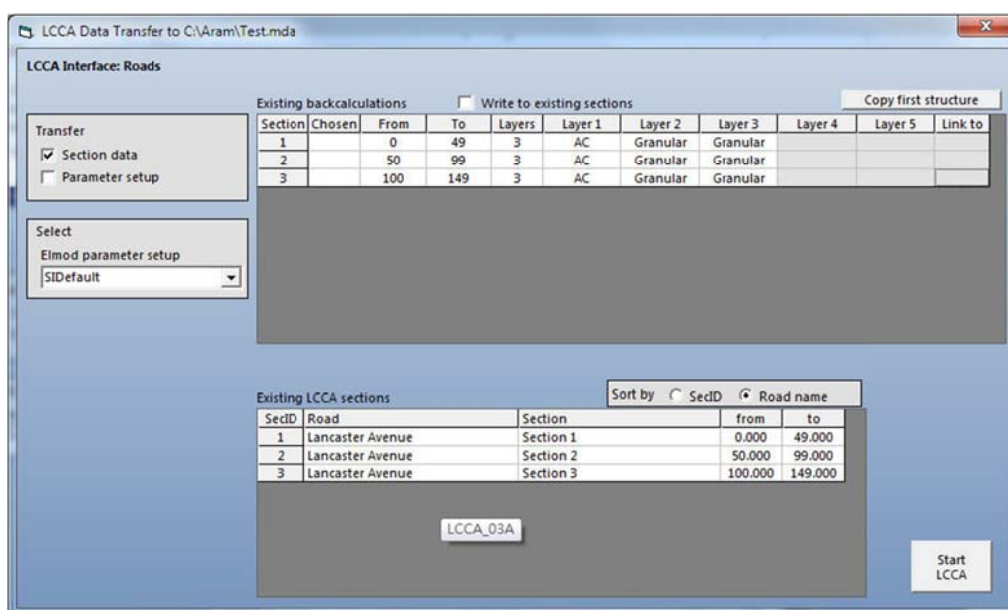


Figura 27:Modulo LCCA col database

- ♦ Il modulo PCN

Il PCN (Pavement Classification Number) è un modulo opzionale che utilizza i documenti di dati dalla apparecchiature FWD/HWD per calcolare i valori ACN/PCN basati sui metodi utilizzati da ICAO e FAA. Il programma include un database di oltre 125 velivoli.

I risultati del processo backcalculation possono essere usati per calcolare il valore PCN.

I parametri che definiscono le proprietà dei materiali, il traffico etc sono controllabili dall'utente.

#### **4.5 Modulo LCCA**

Il modulo LCCA è il più importante al fine di determinare le strategie di M&R in modo economico. Obiettivo della presente Tesi è l'individuazione le migliori strategie di M&R utilizzando il modulo LCCA di ELMOD per una pista di un aeroporto italiano, quindi in questo paragrafo si spiegherà in modo dettagliato il funzionamento del modulo LCCA.

Il modulo LCCA può essere applicato sia a livello di rete che a livello di progetto. I due diversi livelli comportano un funzionamento diverso.

A livello di progetto, il modulo LCCA del programma ELMOD, può essere utilizzato per:

- ♦ Valutare la fattibilità di una strategia di M&R a lungo termine.
- ♦ Determinare i benefici dall'investimento.
- ♦ Confrontare le varie strategie di M&R per il processo decisionale.

Invece a livello di rete, il modulo LCCA di AIRPORTS, viene utilizzato per:

- ♦ Selezionare le strategie di M&R.
- ♦ Ottimizzare il budget.
- ♦ Analizzare i futuri investimenti e le allocazioni del budget.
- ♦ Valutare la efficacia di manutenzione preventiva.

Però se non è possibile predire la condizione futura della pavimentazione in modo affidabile, allora non è opportuno applicare il modulo LCCA.

Per quanto riguarda la previsione della condizione futura nel approccio di LCCA DYNATEST si usa i modelli di tipo incrementali-recursivi per predire la condizione futura della pavimentazione, basandosi sulle equazioni meccanicistico-empiriche che sono in funzione dei parametri strutturali attuali come:

- ♦ I moduli elastici degli strati (meccanicistico)
- ♦ Le funzioni di trasferimento (empirico)
- ♦ Gli spessori dello strato e tipi di materiale (in situ)

Il metodo ricorsivo degli ammaloramenti accumulati dalla pavimentazione nel programma DYNATEST è il Performance and Economic Rating System – PERS per predire la condizione della pavimentazione.

Questo approccio viene utilizzato perché la precisione di qualsiasi modello LCCA è fortemente dipendente dall'affidabilità della condizione futura predetta della pavimentazione.

Il Performance and Economic Rating System (PERS) può essere utilizzato a livello di rete nel Pavement Management System per determinare automaticamente le più efficienti strategie di manutenzione e riabilitazione per un grande numero di sezione di pavimentazione, da cui la combinazione ottimale può essere determinata per un certo livello di budget durante il periodo di analisi definito. Il PERS può essere utilizzato come lo strumento a livello di progetto per calcolare gli effetti delle differenti strategie di manutenzione e riabilitazione su una sezione particolare. I diversi livelli di affidabilità possono essere utilizzati sulle singole sezioni.

Essenzialmente il PERS utilizza l'approccio ricorsivo-incrementale per calcolare la prestazione della pavimentazione per ogni incremento di tempo (di solito una stagione) in relazione al danno causato da il carico di traffico e dagli effetti relativi al tempo. Poi la nuova condizione della pavimentazione viene utilizzata come input in modo ricorsivo per il successivo incremento di tempo. Attraverso la prestazione e l'analisi costo/beneficio il PERS può valutare le specifiche soluzioni di manutenzione dalla lista di alternativa e generare una serie di possibili piani di manutenzione sulla base di ottimizzazione dei costi di agenzia o dei costi totali per la vita utile della pavimentazione.

Il PERS è composto dai seguenti elementi principali:

- ♦ I modelli di materiale per predire la prestazione della pavimentazione sulla base dei principi meccanistici.
- ♦ I modelli per quantificare gli effetti economici della condizione della pavimentazione
- ♦ I modelli empirici che possono essere calibrati automaticamente, e utilizzati come le alternative ai modelli meccanicistici.

- ♦ L'analisi costo/beneficio per ottimizzare la strategia di manutenzione L'analisi costo/beneficio per ottimizzare la strategia di manutenzione L'analisi costo/beneficio per ottimizzare la strategia di manutenzione per la sezione individuale e rete.
- ♦ L'ottimizzazione delle sezioni e reti considerando i molteplici scenari di opzione di riabilitazione per un periodo di 20-25 anni.

Il metodo incrementale-ricursivo calcola le tensioni e le deformazioni critici dalla prova FWD, usando il modello meccanistico per ogni tipo di carico al momento della prova e la prima applicazione del carico teorico (incremento), può anche utilizzare le tensioni e le deformazioni per prevedere l'aumento dei danni al momento dell'incremento di carico. Inoltre deve ipotizzare che gli ammaloramenti totali della pavimentazione siano pari alla somma del danno cumulativo della pavimentazione durante il periodo di progettazione.

$$MN_p = \left[ \frac{\mu\varepsilon}{238 \mustrain} \times \left( \frac{E}{3000 MPa} \right)^{0.259} \right]^{-3.291}$$

$MN_p$  è il numero dei passaggi di carico ammissibili secondo la legge di fatica di un materiale specifico, è in funzione del modulo elastico che è ricavato dall'indagine condotta mediante FWD, la deformazione calcolata e la deformazione di riferimento (238  $\mu$ strain), il danno della pavimentazione è il rapporto tra il numero dei passaggi previsto e il numero passaggi ammissibili.

L'obiettivo finale del LCCA è quello di determinare la strategia di budget e di riabilitazione che si tradurrà in minor costo totale per la Società di Trasporto, cioè la somma dei costi di agenzia e costi dell'utente (come si vede in Figura 28).

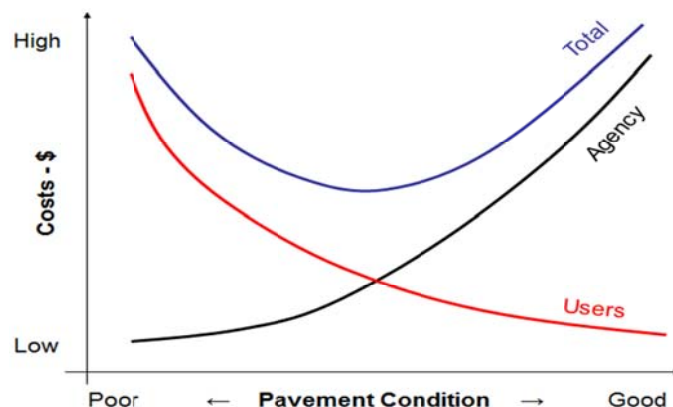


Figura 28: Analisi dei costi

I costi dell'utente dipendono dalle condizioni funzionali delle pavimentazioni. La

rugosità si tradurrà in un maggiore consumo di carburante e una maggiore usura sui veicoli. Le ormaie o la bassa resistenza all'attrito possono provocare gli incidenti, ecc, che costituiscono un costo. Il sistema di gestione della pavimentazione, dunque, deve essere in grado di prevedere le condizioni funzionali future, con o senza la riabilitazione. La condizione funzionale futura dipende dalle condizioni strutturali presenti e future, che hanno anch'esse bisogno di essere previste. È costoso per l'agenzia mantenere il sistema delle pavimentazioni in buone condizioni. Ma risulta ancora più costoso per gli utenti, e quindi anche per società, se il sistema della pavimentazione è in cattive condizioni. Per esempio i costi di un'Agenzia autostradale sono in genere solo il 10% dei costi totali di trasporto, quindi lo scopo è quello di minimizzare i costi complessivi con i opportuni interventi manutentivi nel periodo giusto. Risulta altrimenti molto costoso intervenire rispetto al momento giusto, quando la pavimentazione è in condizioni di grave degrado; è meglio cioè effettuare manutenzioni ordinarie di piccola entità e ad intervalli di tempo regolari piuttosto che intervenire quando la pavimentazione presenta condizioni gravemente danneggiate (Figura 29).

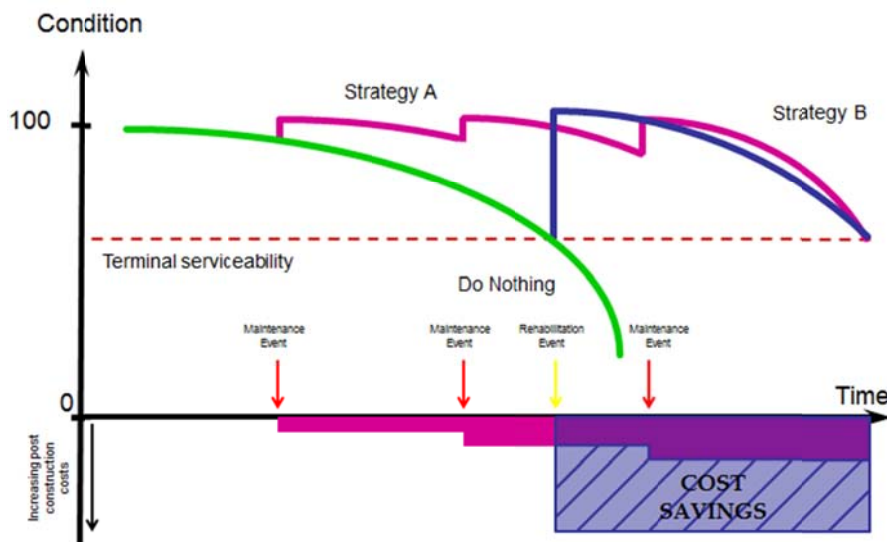


Figura 29: Diverse strategie di M&R con LCCA

Nella figura 29 l'area tratteggiata in blu rappresenta i soldi risparmiati confrontando la strategia A con la strategia B, che viene effettuata quando le condizioni della pavimentazione sono gravemente danneggiate.

Il modulo LCCA elabora i dati FWD con una serie di processi complessi al fine di arrivare lo scopo finale, com'è presentato nella figura 30.

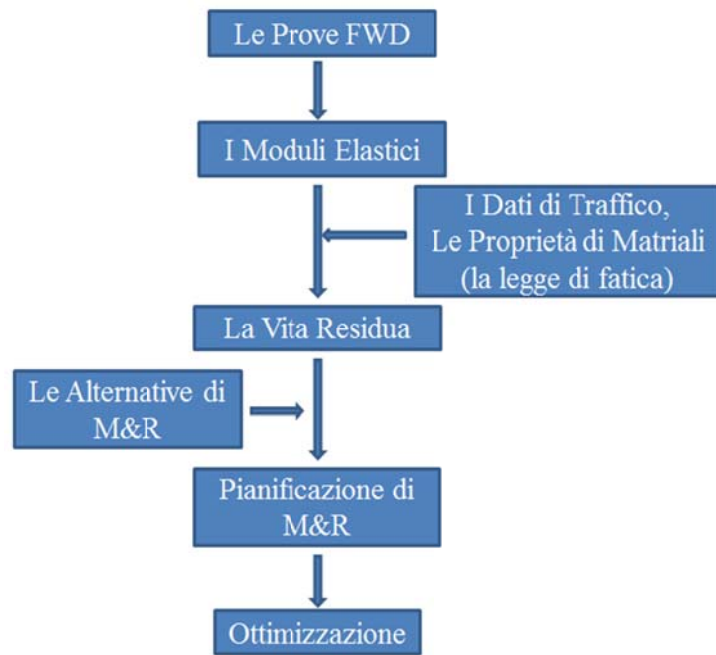


Figura 30:Schema di definizione piano di manutenzione

## Capitolo 5 – ANALISI LCCA DI UNA PISTA DI UN AEROPORTO

### ITALIANO

#### 5.1 Acquisizione dei dati

L'analisi LCCA (Life Cycle Cost Analysis) permette di ricavare l'ottimale strategia di manutenzione e riabilitazione (M&R) per le sezioni della pavimentazione oggetto d'indagine, basandosi su di una analisi di costo del ciclo di vita utile per ogni opzione di manutenzione, e organizzando le soluzioni secondo i rapporti costi/benefici. I principali input sono i dati di portanza (FWD), gli spessori degli strati (GPR), gli ammaloramenti superficiali (MFV-LCMS), le regolarità longitudinali e trasversali (PROFILOMETRO), la macrotestitura, lo spettro di traffico che interessa la sezione.

#### 5.11 Acquisizione dei dati di portanza (FWD)

I dati di portanza vengono rilevati mediante apparecchiatura deflettometrica (utilizzando il deflettometro a massa battente tipo Dynatest 8012 – Fast Falling Weight Deflectometer – FFWD serie 8012-007).

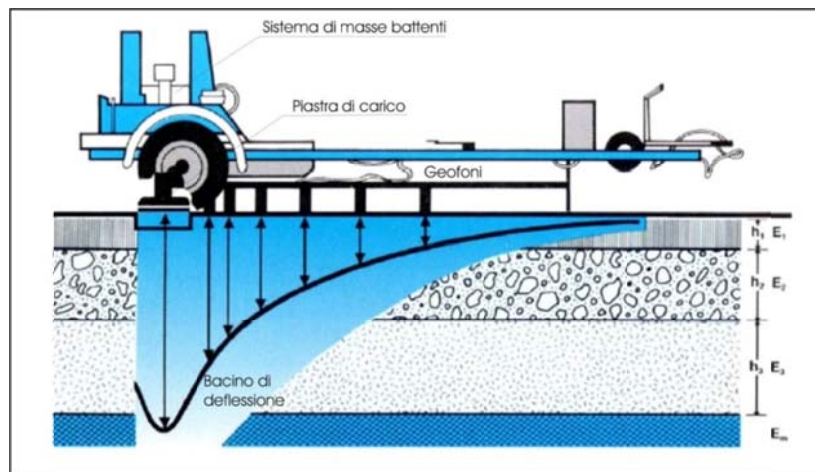


Figura 31:Deflettometrica Dynatest FFWD

L'utilizzo dell'apparecchiatura Fast Falling Weight Deflectometer FFWD comporta 5 benefici rispetto all'utilizzo del tradizionale FWD:

- ♦ Il FFWD permette di indagare il 75% in più di punti per ora, comportando il 45% in meno di esposizione al traffico.
- ♦ Minori costi di manutenzione.



- ♦ Maggiore facilità di formare gli operatori e offrire un servizio personalizzato.
- ♦ I dati coerenti con DYNATEST Modello 8002 FWD, che possono essere analizzati utilizzando il software ELMOD 6.
- ♦ La possibilità di aggiornamento dal Modello 8002 FWD a FASTFWD.

L'apparecchiatura consente di valutare le caratteristiche di rigidità dei materiali costituenti la pavimentazione e del relativo sottofondo, cioè i moduli elastici del semispazio equivalente e degli strati componenti la sovrastruttura. Per le prove su pavimentazioni aeroportuali si utilizza un sistema di masse battenti in grado di imprimere impulsi fino a 120 kN, e creare le tensioni trasmesse dalla piastra di carico circolare (di diametro pari a 300 mm) alla superficie della pavimentazione fino a 1600 Kpa, in grado di simulare i diversi carichi dinamici dell'aeromobile durante le fasi di decollo e atterraggio.

Durante la prova, per ogni stazione, sono state registrate 3 cadute di massa battenti da un'altezza tale da imprimere alla pavimentazione un carico corrispondente a una pressione di circa 1600 kPa.

Per garantire una distribuzione uniforme delle tensioni di contatto, si utilizza una piastra di carico convenzionale di tipo "segmentato", di raggio di 150 mm, che meglio si adatta alla superficie della pavimentazione sollecitata.

Il rilievo delle deflessioni della superficie della pavimentazione, indotte dalle sollecitazioni di prova, è stato effettuato tramite 9 geofoni disposti radialmente rispetto al centro della piastra e tra loro distanziati secondo intervalli crescenti all'aumentare della distanza dal centro della piastra stessa.

Il posizionamento dei geofoni varia in funzione del tipo di rilievo che viene effettuato; per la presente campagna di indagini la configurazione adottata è stata la seguente:

Geofono	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Distanza dal centro della piastra (mm)	0	-200	-300	450	600	900	1200	1500	1800

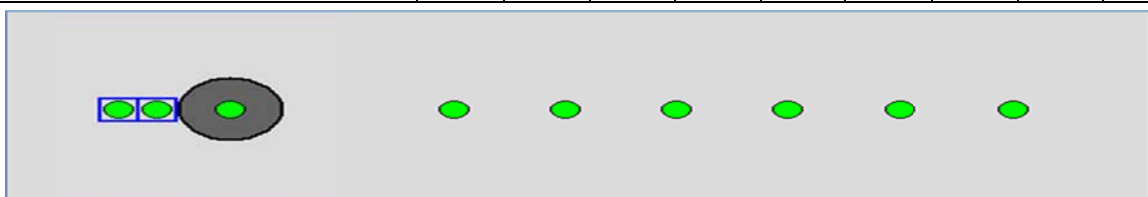


Figura 32: Disposizione dei geofoni

L'apparecchiatura ha un'accuratezza assoluta almeno pari al  $2\% \pm 2 \mu\text{m}$  e con risoluzione pari a  $0.1 \mu\text{m}$  per il rilievo della deflessione. Invece i livelli del carico applicato vengono rilevati con una accuratezza almeno pari a  $2\% \pm 0.3 \text{ kN}$ ; per questa grandezza la risoluzione è variabile da 0.03 a 0.2 kN in rapporto all'entità del carico applicato.

### **5.12 Acquisizione degli spessori (GPR)**

L'utilizzo del georadar, noto anche come GPR (Ground Penetrating Radar), per il rilievo degli spessori della pavimentazione è una metodologia non invasiva utilizzata in geofisica, che permette di investigare sulla struttura e sugli strati superficiali del sottosuolo attraverso l'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche ad alta frequenza. Nei casi più favorevoli il metodo permette l'investigazione fino a circa 30 metri di profondità utilizzando antenne di idonea frequenza.

Nel nostro caso, le indagini georadar (Ground Penetrating Radar-GPR) sono state eseguite mediante strumentazione di tipo HI-PAVE prodotta da IDS-Ingegneria dei Sistemi S.p.A, dotata di 3 antenne che operano a una frequenza di 400, 900 e 2000 MHz. In base ai fenomeni di attenuazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo attraversato l'antenna a 400 MHz permette di raggiungere profondità superiori, mentre quelle a 900 e 2000 MHz consentono un superiore livello di dettaglio per l'analisi degli strati più superficiali.

Hi-Pave è una soluzione georadar ad alta velocità progettato per la strada e/o la valutazione dell'ispezione di una pista. Il sistema è in grado di operare con più antenne allo stesso tempo e fornisce una valutazione completa delle condizioni, compresa:

- ♦ Misurazione dello spessore della pavimentazione.
- ♦ Valutazione della superficie, base, sottobase della strada.
- ♦ Rilevamento di cavità, spazi vuoti e delaminazione.
- ♦ Rilevamento di acqua sotto la superficie satura.
- ♦ Valutazione delle condizioni della pista d'aeroporto.

L'impiego di strumentazione Hi-Pave ha i seguenti benefici:

- ♦ Valutazione dello stato della pavimentazione per nuove costruzioni stradali.
- ♦ Monitoraggio periodico delle condizioni della strada e della pista per la manutenzione preventiva.

- ♦ Soluzione GPR ad alta velocità e strumenti software di rilievo dello strato semi-automatici, minimizzando le indagini e i tempi di elaborazione.
- ♦ Soluzione flessibile che può integrare fino a 8 antenne GPR.

Altri notevoli vantaggi:

- ♦ Antenne a tromba: Hi-Pave è dotato di antenne a tromba che possono essere utilizzate, senza contatto con la superficie.
- ♦ Velocità: Hi-Pave è il più veloce GPR per la valutazione della pavimentazione. Si può raggiungere fino a 260 km/h con una singola configurazione di antenna, effettuando un dato di campionamento ogni 10 cm oppure raggiungendo i 130 km/h con una configurazione a doppia antenna , effettuando un dato ogni 10cm.
- ♦ Procedura semi-automatica per il riconoscimento strato: Il software di post-processing utilizza una procedura semi-automatica per raccogliere informazioni di strati della pavimentazione.
- ♦ Modulare: Hi-Pave può operare con fino a 8 antenne in un collegamento a catena utilizzando la stessa unità di controllo.



Figura 33:Strumentazione georadar impiegata per i rilievi

#### Principi di funzionamento:

Il Ground Penetrating Radar (GPR) è una strumentazione geofisica il cui funzionamento si basa sull'emissione/ricezione di una successione periodica di onde elettromagnetiche di forma sinusoidale, con spettro di emissione centrato su una frequenza principale.

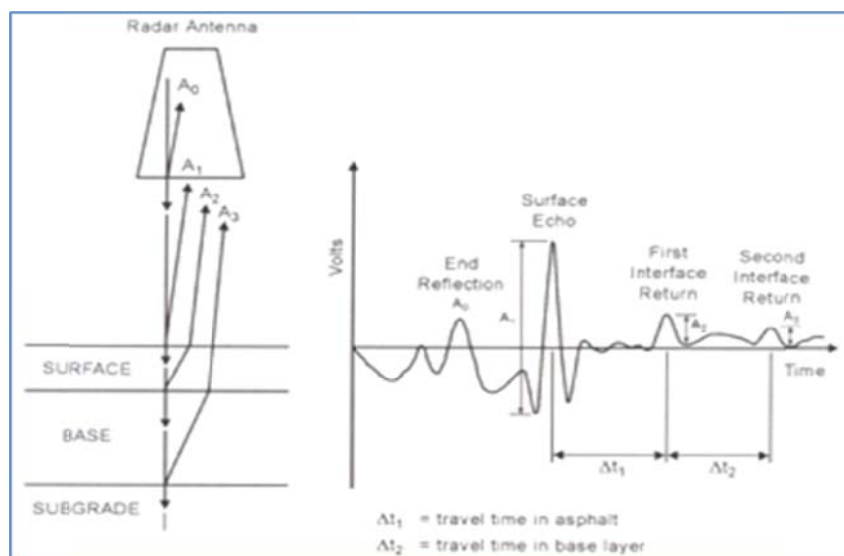


Figura 34: Principi di funzionamento GPR

Il sistema GPR trasmette nel materiale impulsi elettromagnetici di una determinata frequenza tramite un trasduttore (antenna). L'impulso si propaga verticalmente nel materiale con una certa velocità; quando incontra una interfaccia (superficie di contatto tra due materiali diversi) parte dell'impulso viene riflessa verso la superficie. L'antenna riceve in superficie gli impulsi riflessi dai diversi materiali. "First Interface Return" del grafico in figura 34 è dovuto al riflesso provocato da una forte anisotropia presente in profondità tra lo strato superficiale e la base, "Second Interface Return" è dovuto alla forte anisotropia tra la base e il sottofondo.

Quindi il parametro misurato è il ritardo temporale tra il momento in cui viene propagata l'onda e l'istante in cui questa, riflessa a seguito dell'intercettazione di ostacoli, ritorna in superficie e viene captata dalle antenne. L'energia di tale onda elettromagnetica, in presenza di brusche variazioni, ostacoli o discontinuità, viene infatti riflessa ed in parte rilevata dalle antenne riceventi del sistema. Attraverso opportune interpretazioni dei dati rilevati con tali sistemi, si riescono a caratterizzare i cambiamenti nelle proprietà elettriche e magnetiche nel sottosuolo, con conseguente possibile deduzione di informazioni nei riguardi di profondità, dimensioni, disposizione di oggetti sepolti, caratteristiche elettriche, di densità, composizione e contenuti di umidità dei sottosuoli, fino ad individuare presenze di cavità e particolari stratificazioni nei terreni monitorati.

La registrazione nel tempo del segnale, relativa al singolo impulso emesso, è definita "traccia", mentre il risultato della prospezione è un radargramma. Quest'ultimo consiste in una rappresentazione bidimensionale (distanza/tempi) in cui in ascissa è espressa la posizione

delle antenne lungo il profilo e in ordinata è riportato il “travel time”, cioè il tempo di andata e ritorno del segnale, oppure la profondità stimata sulla base di un'assegnata velocità di propagazione.

Le proprietà fisiche dei materiali che governano la propagazione delle onde elettromagnetiche sono la costante dielettrica e l'attenuazione.

La costante dielettrica relativa ( $\epsilon_r$ ) è un parametro adimensionale che esprime il rapporto tra la velocità degli impulsi elettromagnetici nel vuoto e nel materiale in oggetto:

$$\epsilon_r = \frac{c^2}{v^2}$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto ( $3 \times 10^8$  m/s) e  $v$  è la velocità delle onde elettromagnetiche nel materiale considerato. La conoscenza della costante dielettrica relativa è essenziale ai fini interpretativi, in quanto permette di calcolare la profondità ( $h$ ) di una superficie riflettente. Infatti:

$$h = \frac{c * t_r}{2 * \sqrt{\epsilon_r}}$$

dove  $t_r$  è il tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione dell'impulso.

L'attenuazione esprime invece la diminuzione dell'intensità del segnale per unità di lunghezza percorsa all'interno del materiale. Essa può essere considerata una funzione complessa della conducibilità elettrica, un'altra caratteristica fisica dei materiali, ed è espressa in dB/m. In generale è possibile affermare che la profondità di indagine massima ottenibile in un determinato materiale dipende dal suo valore di attenuazione. Valori elevati si hanno per i materiali caratterizzati da elevati valori di conducibilità elettrica, quali limi, argille, materiali cristallini solubili, metalli e acque saline; valori bassi sono invece caratteristici di rocce cristalline, ghiaie, sabbie e acque demineralizzate.

La figura 35 riporta i valori della costante dielettrica relativa e dell'attenuazione (in dB/m) per alcuni dei materiali più comuni. Si può rilevare come la presenza di acqua sia responsabile dell'aumento dei valori di entrambi i parametri, sebbene con intensità diversa nei vari materiali.

Materiale	Attenuazione (in dB/m)		Costante dielettrica	
	Secco	Bagnato	Secco	Bagnato
Asfalto	2-15	2-20	2-4	6-12
Argilla	10-20	20-100	2-10	4-40
Granito	0,5-3	2-5	5	7
Calcare	0,5-10	10-25	7	8
Sabbia	0,01-1	0,03-0,3	4-6	10-30
Cemento/mattoni	2-12	10-25	4-10	10-20
Terreno sabbioso	0,1-2	1-5	4-6	15-30
Terreno argilloso	0,3-3	5-30	4-6	10-15

Figura 35: Valori di costante dielettrica relativa e attenuazione mostrati dai materiali più comuni

### 5.13 Rilievi degli ammaloramenti superficiali, regolarità longitudinali e trasversali, macrotesirature (MFV)

La strumentazione impiegata per i rilievi è denominata Multi Functional Vehicle (MFV); La MFV è in grado di registrare i seguenti dati richiesti in maniera obiettiva e accurata, tra cui: (1) la rugosità della pavimentazione, (2) le ormaie presenti sulla superficie, (3) la macrotesitura, (4) le fessurazioni, e (5) la geometria della pavimentazione:

- ♦ Le fessurazioni trasversali quantificate dalla larghezza della fessura e numero della fessura esposte su immagini ad alta risoluzione della superficie della pavimentazione.
- ♦ Le fessurazioni longitudinali a pelle di coccodrillo e a blocchi raccolte su immagini ad alta risoluzione della superficie della pavimentazione.
- ♦ Le rugosità con il ProFAA standard raccolte utilizzando il Road Surface Profilometer® (RSP III) montato sulla parte anteriore della MFV.
- ♦ Ormaiamenti riportati utilizzando tre livelli di gravità raccolti utilizzando il Road Surface Profilometer® (RSP III) montato sulla parte anteriore della MFV e dotato di un minimo di 17 sensori (espandibile a 21 sensori).

Un MFV appositamente allestito da Dynatest (Figura 36) ha le seguenti apparecchiature principali installate a bordo:

- ♦ Il sistema di telecamere INO Laser Cracking Measurement System (LCMS) per l'acquisizione delle immagini e la scansione della superficie della pavimentazione, ubicato nella parte posteriore del veicolo.

- ♦ La barra profilometrica Road Surface Profiler (Dynatest RSP-5051 Mark III) nella configurazione con 17 sensori laser, ubicata nella parte anteriore del veicolo.
- ♦ Una telecamera anteriore posizionata all'interno del veicolo.
- ♦ Il sistema AgGPS 132 Trimble con accuratezza inferiore al metro posizionata sul tetto del veicolo.
- ♦ L'odometro Distance Measurement Instrument (DMI) in corrispondenza della ruota posteriore sinistra.

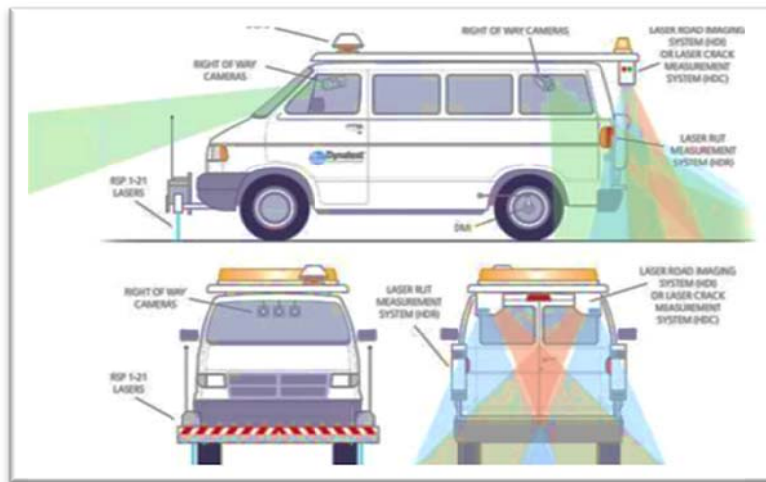


Figura 36: Laser Cracking Measurement System (LCMS) installate su MFV

Il componente di acquisizione delle immagini laser della superficie della pavimentazione è un Laser Cracking Measurement System (LCMS) realizzato dalla INO System. Il sistema LCMS è composto da due camere a scansione lineare ad alta risoluzione configurate per rilevare una sezione trasversale della pavimentazione di larghezza pari a 4m: il fascio laser rileva su questa sezione la posizione verticale (elevazione/depressione) di 4096 punti con un passo di campionamento trasversale pari ad 1 mm e una risoluzione verticale pari a 0.1mm

(Figura 38). Il passo di acquisizione longitudinale è funzione dalla velocità di avanzamento del veicolo, solitamente limitata a 80 km/h per consentire un passo di acquisizione pari a 2.5 mm.

Il LCMS combinato con illuminazione rende possibile ispezionare le superfici di pavimentazione anche di notte senza perdere la qualità delle immagini raccolte. La valutazione della gravità e l'area degli ammaloramenti possono essere regolate in base a qualsiasi procedura visiva esistente, come ad esempio il metodo PCI. Un altro vantaggio principale è che tutti i dati raccolti sono georeferenziati, ciò permette riportarli in un sistema GIS esistente o esportare i risultati in Google Earth per la visualizzazione ottimale della posizione di ciascun ammaloramento.

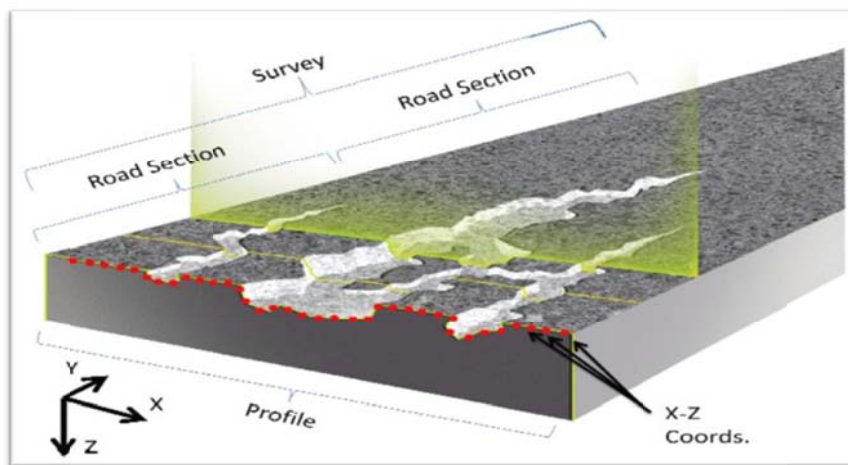


Figura 37: Rilievo degli ammaloramenti delle pavimentazioni

Il posizionamento del sistema di acquisizione immagini è stato progettato per aumentare il contrasto e la visibilità sia delle fessure longitudinali che quelle trasversali.

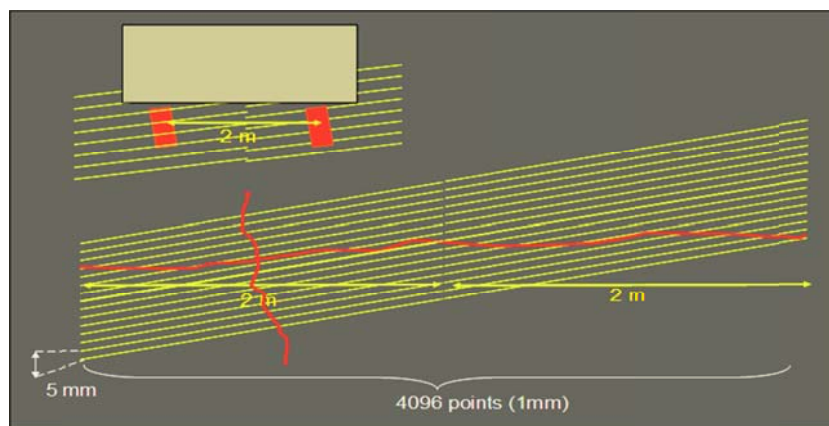


Figura 38: Sistema LCMS

Il software “Dynatest Explorer” è stato appositamente sviluppato da Dynatest e consente



di identificare in modo automatico la maggior parte degli ammaloramenti presenti sulla pavimentazione investigata, classificando le diverse tipologie di fessure sulla base dell'estensione (lunghezza e larghezza o area) e del grado di severità, così come previsto dalle principali Normative Internazionali. La valutazione della gravità delle fessure in base alla larghezza delle fessure è identificata dal codice di colore (Figura 39).

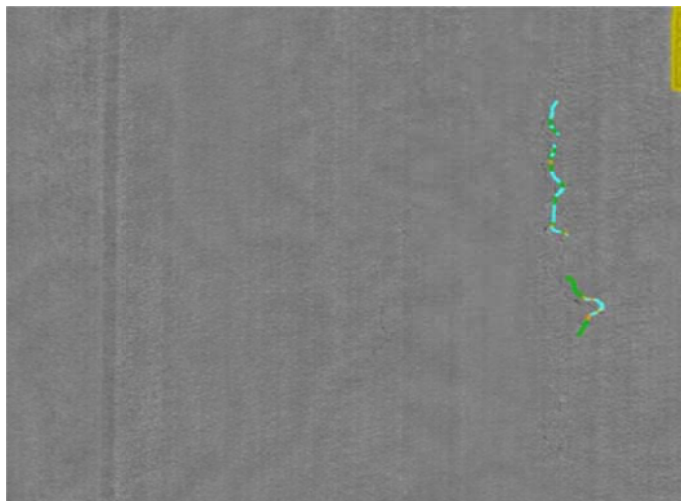


Figura 39: Immagine con le fessure individuate automaticamente

Il MFV è dotato della barra profilometrica Dynatest Mark III (Road Surface Profiler) in grado di misurare in tempo reale del profilo longitudinale per il calcolo della rugosità come l'IRI (International Roughness Index), profilo trasversale per la misura di ormaimento della pavimentazione, e macrotestitura (MPD-Mean Profile Depth). Tutti i dati registrati sono legati al DMI (Distance Measurement Instrument) così come riferimento di GPS. L'apparecchiatura RSP soddisfa i requisiti dell'ASTM, AASHTO e State Road Standards per l'accuratezza, garantendo che i dati possano essere utilizzati per la valutazione a livello di progetto e a livello di rete in un APMS.

La RSP-III è un sistema completamente aggiornabile che offre fino a 21 laser.

L'apparecchiatura RSP ha i seguenti benefici economici:

- ♦ Selezionare la rugosità rapida di tutte le sezioni della rete;
- ♦ Lavorare a velocità del traffico in modo tale da non rendere necessaria alcuna gestione del traffico;
- ♦ Offrire la raccolta dei dati, l'analisi e la conservazione in tempo reale, risparmiando il tempo prezioso di ingegneria per la post-processing dei dati;
- ♦ Possono raccogliere sia l'IRI che i dati di macrotestitura simultaneamente in un unico

passaggio;

Dal punto di vista ingegneristica l'apparecchiatura RSP ha i seguenti benefici:

- ♦ Il monitoraggio automatico delle letture di laser garantisce un'elevata qualità dei dati;
- ♦ I dati altamente accurati, ripetibili e riproducibili consentono di essere utilizzati in un PMS;
- ♦ Il sistema modulare è facile per mantenere, servire e aggiornare;
- ♦ La caratteristica "Stop and Go" permette di effettuare la prova per i brevi tratti e le strade urbane, rende ideale RSP per la raccolta e l'analisi dei dati sia a livello di progetto che a livello di rete;
- ♦ Tutti i dati sono georeferenziati consentendo di riportarli in un sistema GIS;
- ♦ Il programma RSPWin dà la guida passo passo per la calibrazione dei laser, accelerometri e DMI in modo semplice e facile.

I parametri che possono essere acquisiti grazie all'utilizzo di questo tipo di apparecchiatura sono molteplici, in relazione al numero e alla tipologia di strumentazioni installate.



Figura 40: Road Surface Profiler

Nella configurazione di rilievo sono presenti le seguenti strumentazioni:

- ♦ 17 laser ottici per l'acquisizione delle elevazioni;
- ♦ 1 laser ottico per l'acquisizione della tessitura;
- ♦ 2 accelerometri per il rilievo e la compensazione delle oscillazioni verticali;
- ♦ 1 sistema inerziale IMU (Inertial Measurement Unit) per il rilievo dei dati giroscopici.

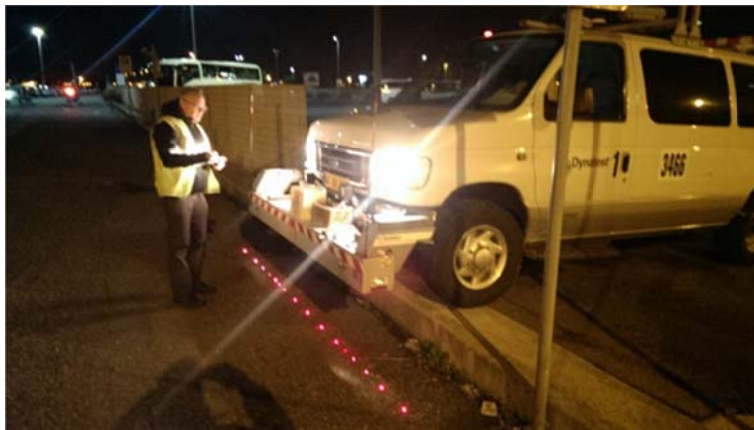


Figura 41: Fase di calibrazione di profilometro

Utilizzando tutte le informazioni a disposizione è possibile calcolare:

- ♦ il profilo longitudinale della pavimentazione e valutare la regolarità secondo indici codificati;
- ♦ il profilo trasversale;
- ♦ la profondità delle ormaie;
- ♦ la macrotestitura superficiale;
- ♦ il raggio di curvatura dell'allineamento di rilievo;
- ♦ le accelerazioni orizzontali, verticali e trasversali del veicolo

Il layout di prova è stato determinato in modo da coprire l'intera lunghezza e larghezza di tutte le infrastrutture analizzate, considerando per ciascun allineamento di prova una fascia utile di 3.75m e una zona di ricoprimento fra allineamenti contigui pari 0,25m.

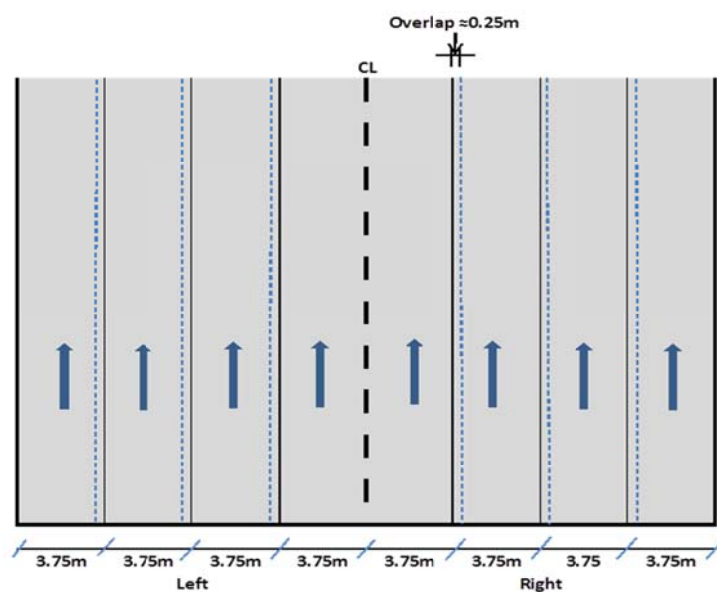


Figura 42: Schema di rilievo dei test condotti su allineamenti paralleli

## 5.2 Elaborazione dei dati

Per funzionare la analisi LCCA con il programma ELMOD, è necessario elaborare i dati rilevati e inserirli dentro LCCA. I dati includono: i moduli elastici degli strati, gli spessori degli strati, i PCI, gli IRI, i RD (Rut Depth) e i traffici.

### 5.21 Determinazione del modulo elastico

#### Modulo superficiale

Un'immediata valutazione della capacità portante complessiva di una sovrastruttura può essere eseguita calcolando i moduli superficiali del semispazio equivalente attraverso le deflessioni rilevate a centropiastra con FFWD. Questa valutazione si fonda sull'ipotesi di semispazio omogeneo, elastico lineare e isotropo. Tali presupposti tuttavia risultano essere difficilmente verificati nella pratica, sia per la natura ed il comportamento stesso dei materiali impiegati, che per la struttura a multistrato utilizzata per la realizzazione delle pavimentazioni. Ciò nonostante, sebbene le ipotesi di partenza non siano necessariamente verificate, l'analisi dei moduli equivalenti risulta essere un importante strumento per comprendere al meglio il comportamento di una pavimentazione soggetta a carichi di diversa natura ed entità. Sulla base delle equazioni di Boussinesq il modulo di un semispazio elastico, omogeneo e isotropo, sollecitato da una piastra circolare, è dato (relativamente alla deflessione al centro della piastra di carico) dalla relazione:

$$E_0 = \frac{f * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{d_0}$$

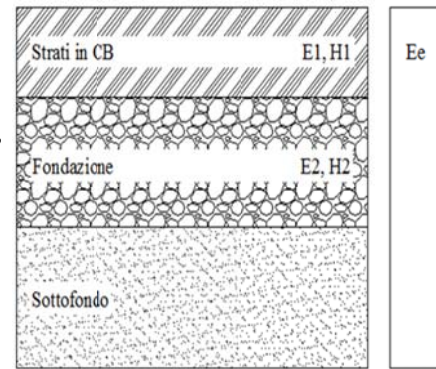
dove  $d_0$  rappresenta la deflessione al centro dell'area di carico,  $a$  il raggio di tale area,  $\nu$  il coefficiente di Poisson,  $\sigma_0$  la pressione applicata dalla piastra di carico ed  $f$  è una costante che dipende dalla distribuzione delle pressioni, assunta pari a 1.

#### Backanalysis

Sulla base dei valori rilevati delle deflessioni e degli spessori dei singoli strati, ricavati dalle elaborazioni dei dati GPR, tramite procedure di backanalysis basate sulle modellazioni delle pavimentazioni in un multistrato elastico è possibile ricavare:

Il modulo di deformazione "Ee" della pavimentazione nel suo complesso compreso il relativo sottofondo;

Il modulo elastico equivalente “E1” del complesso degli strati in conglomerato bituminoso, il modulo “E2” della fondazione e il modulo “Es” del terreno di sottofondo, associando gli spessori H1 e H2 ai rispettivi strati.



Per le elaborazioni di backcalculation è stato adottato uno spessore dello strato di Fondazione pari a 35cm. Per il calcolo secondo la procedura di backanalysis è stato utilizzato il software “ELMOD 6”, prodotto dalla Dynatest International A/S.

Per tenere in considerazione le variazioni di modulo del complesso degli strati in conglomerato bituminoso in funzione della temperatura della pavimentazione è stata adottata la legge di variazione proposta dall’Asphalt Insititute, assumendo i seguenti coefficienti correttivi

$$E_s = 10^{(T^2 - T_p^2)} * E_{20}$$

dove:

- $T_p$  temperatura dello strato al momento dell’esecuzione della prova (in °F);
- $T$  temperatura di riferimento pari a 20°C (68°F);
- $E_{20}$  modulo dello strato bituminoso alla temperatura di 20°C (MPa);
- $E_s$  modulo dello strato bituminoso alla temperatura media stagionale (MPa);
- $\alpha$  coefficiente che indica la suscettività termica del materiale. Tale valore è stato assunto pari 0.00010 in conformità a quanto indicato in letteratura tecnica.

## 5.22 Determinazione dell’indice ACN/PCN

La classificazione delle pavimentazioni aeroportuali è stata effettuata ricorrendo alla procedura internazionale unificata, sviluppata dall’ICAO, che si basa sulla definizione degli indici ACN e PCN.

Utilizzando questo metodo è possibile esprimere l’effetto che un determinato aereo ha su differenti tipologie di pavimentazioni attraverso un singolo indice numerico, che varia al variare del tipo di sovrastruttura, della condizione di carico massimo al decollo e carico

operativo a vuoto, della tensione di lavoro calcestruzzo, della pressione di gonfiaggio e della resistenza del sottofondo, senza dover specificare gli spessori della pavimentazione stessa. Questo numero prende il nome di ACN (Aircraft Classification Number). D'altra parte, anche la capacità portante di una pavimentazione può essere espressa da un singolo indice numerico senza specificare alcun particolare tipo di aereo, varia al variare del tipo di sovrastruttura, del metodo di valutazione, della portanza del sottofondo e della pressione di gonfiaggio; quest'ultimo indice, relativo alla pavimentazione, prende il nome di PCN (Pavement Classification Number).

L'ACN è il numero che esprime l'effetto di un dato aeromobile sulla pavimentazione per dato standard di portanza del sottofondo, mentre il PCN è il numero che esprime la capacità portante della pavimentazione per un numero abbastanza elevato di operazioni sulla pista (per pavimentazioni flessibili si assume un numero di operazioni pari a 10.000).

Si spiega dettagliatamente che nella presente relazione la determinazione dei parametri ACN/PCN è stata effettuata secondo le specifiche riportate nella Advisory Circular AC No:150/5335-5C emanata dalla FAA Federal Aviation Administration il 14/08/2014.

### **Determinazione dell'indice ACN**

L'ACN è un indice numerico che esprime la “domanda” strutturale di un determinato aereo, espressa in termini di carico su ruota singola standard a in base alla portanza del sottofondo individuata dalle quattro categorie proposte.

Per le pavimentazioni flessibili la procedura ICAO prevede di determinare l'azione del carrello principale di atterraggio del velivolo attraverso il metodo CBR per un numero arbitrario di passaggi pari a 10,000.

Per le pavimentazioni rigide si prevede di determinare l'azione del carrello principale di atterraggio del velivolo attraverso l'utilizzo delle soluzioni elaborate da Westergaard per una piastra elastica su fondazione alla Winkler, assumendo che il calcestruzzo lavori ad una tensione di 2.75 MPa.

Le quattro condizioni di portanza sono le seguenti:

- ♦ Classe A: Sottofondo a resistenza elevata,  $CBR = 15$  per pavimentazioni flessibili (campo  $CBR > 13$ );  $K = 150 \text{ MN/m}^3$  per pavimentazioni rigide (campo  $K > 120 \text{ MN/m}^3$ );

- ♦ Classe B: Sottofondo a resistenza media, CBR = 10 per pavimentazioni flessibili (campo  $8 < \text{CBR} < 13$ );  $K = 80 \text{ MN/m}^3$  per pav. rigide (campo  $60 < K < 120 \text{ MN/m}^3$ );
- ♦ Classe C: Sottofondo a resistenza bassa, CBR = 6 per pavimentazioni flessibili (campo  $4 < \text{CBR} < 8$ );  $K = 40 \text{ MN/m}^3$  per pav. rigide (campo  $25 < K < 60 \text{ MN/m}^3$ );
- ♦ Classe D: Sottofondo a resistenza scarsa, CBR = 3 per pavimentazioni flessibili (campo  $\text{CBR} < 4$ );  $K = 20 \text{ MN/m}^3$  per pavimentazioni rigide (campo  $K < 25 \text{ MN/m}^3$ ).

Utilizzando queste informazioni viene calcolato il carico su ruota singola avente pressione di gonfiaggio pari a 1.25 MPa che, per ogni livello di resistenza del sottofondo, determina uno spessore di riferimento, definito in base al tipo di aereo (disposizione del carrello e delle ruote nella gamba di forza) dal carico e dalla posizione del baricentro di massa. Il carico su ruota singola che scaturisce da questa analisi, espresso in tonnellate e moltiplica per 2, rappresenta per convenzione l'indice ACN del velivolo.

### **Determinazione dell'indice PCN**

Il PCN è un indice numerico che esprime l'offerta strutturale della pavimentazione, definita come capacità della pavimentazione di sopportare i carichi trasmessi da una ruota singola standard con una pressione di gonfiaggio pari a 1.25 MPa.

La valutazione della resistenza di una pavimentazione in termini di indice PCN è un processo che parte dall'individuazione del carico massimo ammissibile su ruota singola; da questo si ricava il valore dell'ACN dell'aereo "critico" che corrisponde proprio al valore minimo di PCN da assegnare alla pavimentazione in esame.

Le norme ICAO prescrivono l'uso di particolari lettere-codici per la facilitazione di tutti gli elementi riguardanti la sovrastruttura. L'indice PCN si compone di uno codice e quattro lettere, ognuno dei quali fornisce le seguenti informazioni:

- ♦ valore numerico del PCN: indica la capacità portante relativa della pavimentazione espressa in termini di carico trasmesso da una ruota singola standard alla pressione di gonfiaggio pari a 1.25 MPa;
- ♦ tipo di pavimentazione: prevede di classificare le pavimentazioni in flessibili e rigide;
- ♦ portanza del sottofondo: viene codificata con lettere che vanno da A a D per entrambi i tipi di pavimentazione, anche se deve essere sottolineato che le modalità di determinazione dei parametri rappresentativi della portanza del sottofondo sono diverse e

condotte con apparecchiature differenti per i due tipi di pavimentazioni;

- ♦ pressione massima dei pneumatici: vengono individuate quattro classi di riferimento.

W: Nessun limite di pressione

X: Pressione limitata a 1.50 MPa (campo 1.01 – 1.50 MPa)

Y: Pressione limitata a 1.00 MPa (campo 0.51 – 1.00 MPa)

Z: Pressione limitata a 0.50 MPa (campo 0 – 0.50 MPa)

- ♦ metodo di valutazione: secondo le indicazioni ICAO è possibile ricavare l'indice PCN o attraverso una semplice analisi diretta (Codice U), per cui il codice numerico del PCN viene assunto pari all'ACN maggiore tra quelli degli aerei che transitano sulle pavimentazioni aeroportuali, oppure attraverso analisi ingegneristiche tecniche correlate al traffico operativo e ad un'attenta analisi delle caratteristiche strutturali della pavimentazione e del sottofondo (Codice T).

Le pavimentazioni subiscono un progressivo deterioramento sotto gli effetti combinati dei carichi e delle condizioni climatiche. Sia il numero di ripetizioni che l'entità dei carichi contribuiscono al deterioramento. Il PCN di una data pavimentazione dipenderà pertanto non solo dalla struttura stessa, ma anche dal numero stimato di ripetizioni di carico che essa dovrà subire nell'arco della sua vita utile. Se questo numero sarà elevato, il PCN risulterà più basso di quello che corrisponde ad un numero di ripetizioni più limitato.

Per la valutazione della pavimentazione, seguendo l'approccio "tecnico", sono stati adottati i seguenti criteri per la determinazione della resistenza a fatica del conglomerato bituminoso e del sottofondo, applicati allo stato tenso deformativo generato da ciascun aereo presente nello spettro di traffico, così come previsto dalla AC 150/5335-5C del 14/08/2014 (Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN), tenendo conto anche delle rispettive caratteristiche geometriche e della dispersione delle traiettorie.

Per quanto riguarda il conglomerato bituminoso è stata adottata la seguente relazione, che consente di determinare il numero di ripetizioni a rottura sulla base del valore massimo di deformazione indotto da ciascun aeromobile presente nello spettro di traffico alla base del complesso di strati in conglomerato bituminoso:

$$\varepsilon_t = 216 * N^{-0.304} * \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-0.259}$$



dove:

t=deformazione per trazione alla base del complesso degli strati in conglomerato bituminoso;

N=Numero di ripetizioni di carico ammissibili;

E=Modulo del conglomerato bituminoso alla temperatura di riferimento;

E<sub>0</sub>=Modulo di riferimento.

Per quanto riguarda il sottofondo è stata adottata la seguente relazione (J. M. Kirk), che limita la massima tensione verticale sul sottofondo ( $\sigma_{vmax}$ ) in base al numero di ripetizioni di carico N:

$$\sigma_{vmax} = 0.120 * \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-0.307} * \left(\frac{E}{160}\right)^{1.16}$$

La determinazione della classe di portanza (indice alfanumerico A-B-C-D) è stata stabilita sulla base dei valori dei moduli elastici del sottofondo derivanti dalla procedura di backcalculation e successivamente applicando la seguente relazione con l'indice CBR (Powell et al., 1984)

$$E(MPa) = 17.6 * CBR(\%)^{0.64}$$

Il calcolo del PCN è stato eseguito secondo la procedura sopra riportata implementata sul software “ELMOD 6”, prodotto dalla Dynatest International A/S.

## 5.23 Analisi dello spettro di traffico

Per l'analisi LCCA (Life Cycle Cost Analysis) sono necessari dati come i dati di traffico, essenziali per la previsione dell'evoluzione del degrado delle pavimentazioni, e quindi dell'evoluzione delle prestazioni delle pavimentazioni. Sono stati utilizzati i seguenti dati relativi al traffico che interessa la sezione oggetto d'indagine::

Tipi AA-MM	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEPT	OCT	NOV	DEC	2015
100	2	2	4	8	14	22	10	12	12	12			98
145						8			2				10
146								2		2			4
310				2									2
319	300	248	352	291	299	362	440	558	370	328	328	338	4,214
320	435	367	462	646	616	682	885	903	843	624	490	508	7,461

<i>Tipi AA-MM</i>	<i>JAN</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>APR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AUG</i>	<i>SEPT</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DEC</i>	<i>2015</i>
<i>321</i>	113	78	93	123	122	192	169	158	231	152	76	169	1,676
<i>330</i>										2			2
<i>332</i>	2	2							2				6
<i>32S</i>	62	81	79	64	57	102	119	105	87	72	72	46	946
<i>B733</i>							8		4		2	2	16
<i>B735</i>	2				16	4	4	8	6	2		2	44
<i>B737</i>						2	4	4	2	4			16
<i>B737/50</i>					2								2
<i>733</i>	8	2		2	20	14	53	39	14	2		4	158
<i>734</i>	18	8	12	4	14	2	4	6	8	10		10	96
<i>735</i>	2			2	4								8
<i>736</i>								2					2
<i>737</i>			2	6	12	14	20	22	14	8	4	4	106
<i>738</i>	808	712	805	1144	1260	1224	1326	1375	1236	1207	1056	1071	13,224
<i>73D</i>								4					4
<i>73G</i>	2		2	12	18	20	20	20	12	4		4	114
<i>73H</i>				2		6	8		12	6			34
<i>717</i>	282	177	230	404	375	407	531	558	419	344	242	374	4,343
<i>752</i>					4								4
<i>757</i>				2				2	2				6
<i>762</i>						4							4
<i>763</i>				4		10	6	8	10	6			44
<i>767</i>				6	8	2	12	8	12	2			50
<i>A319</i>	21	26	29	17	36	28	44	46	28	28	24	20	347
<i>A320</i>	22	14	18	57	27	50	36	60	28	30	38	24	404
<i>AB320</i>	2												2
<i>AB3</i>						2							2
<i>A321</i>	2						2	4	4	8	2		22
<i>A32</i>	10	4	12	6	38	12	10	14	22	6	6	8	148
<i>A330</i>									2	2			4
<i>AN24</i>				2									2
<i>AN72</i>						2							2
<i>A72</i>	194	114	182	172	164	120	230	68	66	84	138	100	1,632
<i>A77</i>	186	156	158	158	180	220	300	459	428	358	256	304	3,163
<i>A72</i>	6	96	62	78	90	96							428
<i>CRJ</i>				2		6	2						10

Tipi AA-MM	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEPT	OCT	NOV	DEC	2015
CRJ2			4										4
CR9	4	2				8	4	2	6	6	4		36
DH8					2	2	10	18	4	2	18	12	68
DH4						4	12	10	2				28
EM4					2				2	2			6
EMB145				2									2
E145	1	1						4	6	2			14
ER4					2				2				4
E170	74	60	76	2	22	8	2	28	2	4			278
E175										2			2
E190	2	4		17	7	6	12	8		6	2	2	66
E75	16	12	8		6		2	2					46
E90	4	2	2	12	6	16	26	28	20	6			122
E95	2		16	20	22	20	20	18	18	16	8	2	162
F50											4		4
F70					2								2
LJ45					1			2			2		5
M80												2	2
M82	3		18	71	68	44	78	69	40			2	393
M83									2				2
<b>TOTALI</b>	2585	2168	2626	3338	3516	3721	4409	4634	3980	3349	2772	3008	<b>40,106</b>

Figura 43: Traffico relativamente ai movimenti registrati nell'anno 2015

Per la determinazione del traffico di progetto sono state assunte le seguenti ipotesi:

- ♦ Elaborazione dei dati di traffico relativi all'anno 2015 e accorpamento, in via cautelativa, degli aeromobili con caratteristiche simili;
- ♦ Tasso di incremento annuo del traffico del 2.5%;
- ♦ L'aeroporto comprende 2 piste di volo, la ripartizione della totalità dei movimenti nella pista 07/25 che viene analizzata è l'80% del traffico totale.

Per suddividere lo spettro di traffico in classi caratteristiche simili, basando sul peso e delle caratteristiche degli aeromobili, è stata eseguita una razionalizzazione cautelativa del mix di traffico, assegnando i movimenti totali degli aeromobili simili al relativo aereo rappresentativo. Il risultato di tale processo è riportato nella seguente figura 44.

Aeromobili	Partenze	Ripartizione
Fokker 100	54	0.26%
Bae 146-200	8	0.04%
A320-200	7083	33.73%
A321-200	889	4.23%
A330-200	6	0.03%
B737-800	7239	34.47%
B717	2300	10.95%
B757-200	5	0.02%
B767-300	51	0.24%
ATR 72	2789	13.28%
Embraer 170	184	0.88%
Embraer 195	183	0.87%
MD82/88	208	0.99%

Figura 44:Spettro di traffico 2015

Basandosi sull'ipotesi che l'80% dei movimenti avvenga dalla pista 07/25 e il restante 20% dall'altra pista, le analisi sono state condotte considerando la seguente ripartizione del passaggio dei velivoli, per i aeromobili piccoli e normali basta la testata 25 (in blu) al fine di decollare e atterrare con una velocità sostenuta, invece per gli aeromobili di dimensioni maggiori non basta la testata 25 più, in caso di decolli e atterraggi, sarà necessario l'impiego anche della testata 07. Quindi assumendo che il traffico in testata 25 è la 100% del traffico RWY 07/25, e il traffico testata 07 è la 30% del traffico RWY 07/25, ovviamente si usano i aeromobili più grandi (come presentato in figura 45).

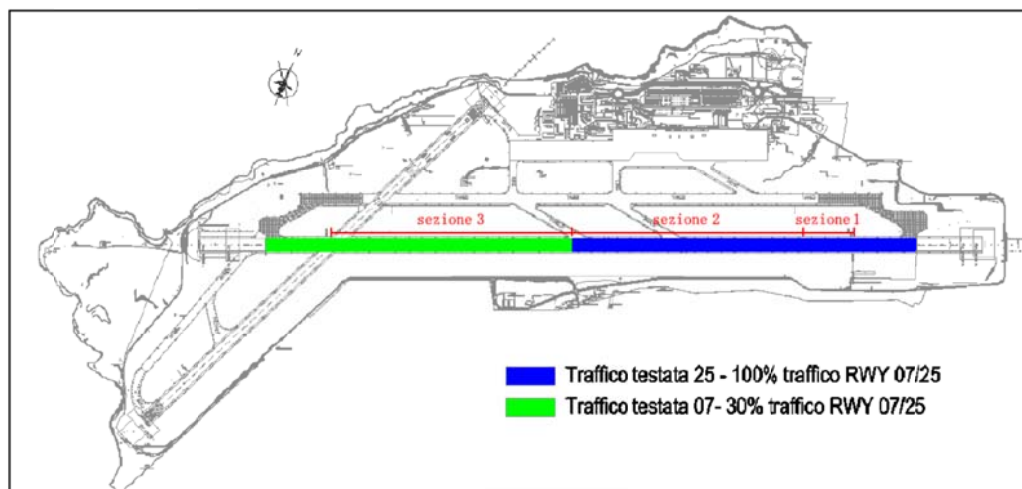


Figura 45:Ripartizione utilizzo della Pista di Volo 07/25

Come conseguenza della ripartizione effettuata per l'utilizzo stimato dell'infrastruttura da parte degli aeromobili, si è giunti ai seguenti spettri di traffico.

Traffico Airport		Traffico RWY 07/25		Traffico Testata 25		Traffico Testata 07	
Aeromobili	Partenze	Aeromobili	Partenze	Aeromobili	Partenze	Aeromobili	Partenze
Fokker 100	54	Fokker 100	43	Fokker 100	43	Fokker 100	13
Bae 146-200	8	Bae 146-200	6	Bae 146-200	6	Bae 146-200	2
A320-200	7083	A320-200	5666	A320-200	5666	A320-200	1700
A321-200	889	A321-200	711	A321-200	711	A321-200	213
A330-200	6	A330-200	5	A330-200	5	A330-200	2
B737-800	7239	B737-800	5791	B737-800	5791	B737-800	1737
B717	2300	B717	1840	B717	1840	B717	552
B757-200	5	B757-200	4	B757-200	4	B757-200	1
B767-300	51	B767-300	41	B767-300	41	B767-300	12
ATR 72	2789	ATR 72	2231	ATR 72	2231	ATR 72	669
Embraer 170	184	Embraer 170	147	Embraer 170	147	Embraer 170	44
Embraer 195	183	Embraer 195	146	Embraer 195	146	Embraer 195	44
MD82/88	208	MD82/88	166	MD82/88	166	MD82/88	50

La analisi viene effettuata sulla pista pavimentata 07/25, suddividendo la pista pavimentata in tre sezioni, escludendo il stopway e il RESA (Runway End Safety Area). Com'è presentato nella figura 45, la sezione 1 e la sezione 2 cadono sulla testata 25, la sezione 3 cade sulla testata 07.

Da qui, si ricava il traffico per ogni sezione.

Aeromobili	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3
Fokker 100	43	43	13
Bae 146-200	6	6	2
A320-200	5666	5666	1700
A321-200	711	711	213
A330-200	5	5	2
B737-800	5791	5791	1737
B717	1840	1840	552
B757-200	4	4	1
B767-300	41	41	12
ATR 72	2231	2231	669
Embraer 170	147	147	44
Embraer 195	146	146	44
MD82/88	166	166	50

Si ipotizza che il gestore aeroportuale si metta d'accordo con la compagnia Emirates Airlines per atterraggio e decollo del Boeing 777-200 nel periodo estivo (dal Maggio-all'Ottobre). Quindi che a causa del turismo, arrivi il traffico B777-200 aggiuntivo quasi gionaliero, per cui si assumono 150 movimenti all'anno. Quindi si può vedere l'influenza di un aeromobile di notevole entità per la pavimentazione e per la sua manutenzione, confrontando queste 2 casi.

Si calcolano i movimenti del Boeing 777-200 su ogni sezione della pista di volo 07/25, basandosi sull'ipotesi già fatta precedentemente che l'80% dei movimenti avvenga dalla pista 07/25 e il restante 20% dall'altra pista, le analisi sono state condotte considerando la seguente ripartizione del passaggio dei velivoli, cioè traffico testata 25-100% traffico RWY 07/25, traffico testata 07-30% traffico RWY 07/25.

- ♦ Sezione 1 ha 120 movimenti di B777-200
- ♦ Sezione 2 ha 120 movimenti di B777-200
- ♦ Sezione 3 ha 36 movimenti di B777-200

<b>Aeromobili</b>	<b>Sezione 1</b>	<b>Sezione 2</b>	<b>Sezione 3</b>
Fokker 100	43	43	13
Bae 146-200	6	6	2
A320-200	5666	5666	1700
A321-200	711	711	213
A330-200	5	5	2
B737-800	5791	5791	1737
B717	1840	1840	552
B757-200	4	4	1
B767-300	41	41	12
B777-200	120	120	120
ATR 72	2231	2231	669
Embraer 170	147	147	44
Embraer 195	146	146	44
MD82/88	166	166	50

### **Le caratteristiche degli aeromobili**

#### **Fokker 100**



Figura 46:Fokker100 della compagnia KLM

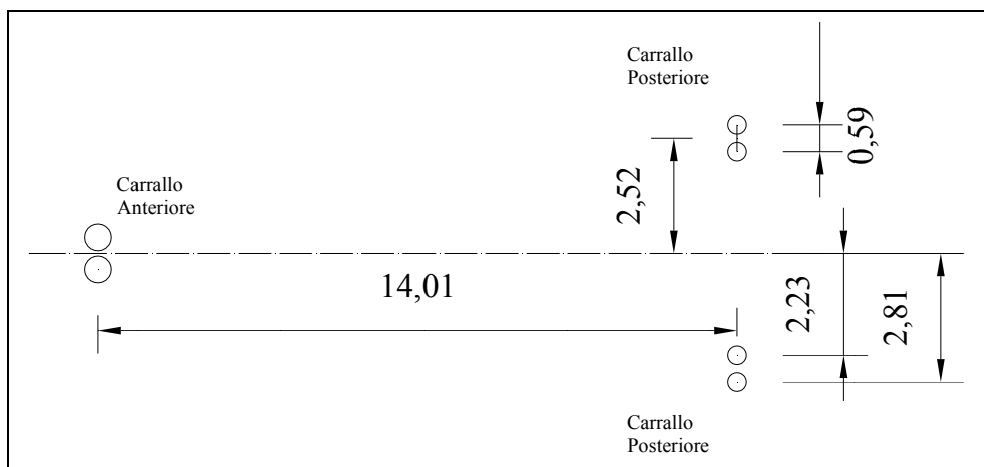


Figura 47:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del F100

#### Aircraft Load Ratings for Fokker 100

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 58.7
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 0.94 (136 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
452	8.4	8.0	8.2	8.3		8.0	8.1	8.3	8.4
243	5.8	5.6	5.8			5.6	5.6	5.6	5.6

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
452	25	27	31	33	28	30	31	33
243	12	13	14	16	13	14	15	16

Bae 146-200



Figura 48: Bae 146-200 della compagnia Air France

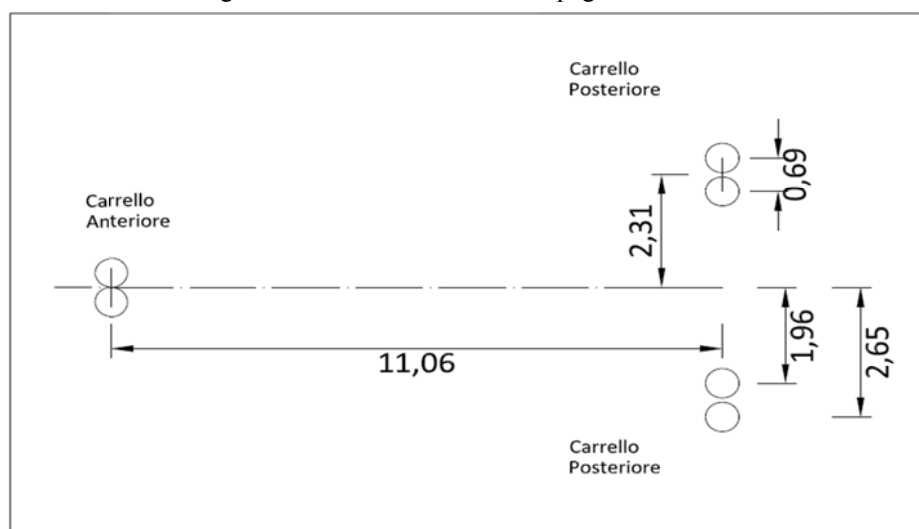


Figura 49: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del Bae 146-200



### Aircraft Load Ratings for Bae 146-200

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 69.0
Load on One Main Gear Leg (%): 46.5	Tire Pressure (MPa): 0.97 (141 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
416	7.9	7.5	7.6	7.7		7.5	7.7	7.8	7.9
235	5.6	5.3	5.6			5.4	5.4	5.3	5.3

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
416	22	23	26	29	24	26	27	29
235	11	12	13	15	12	13	14	15

### A320-200



Figura 50: A320-200 della compagnia Lufthansa

Per lo stesso tipo d'aeromobile sono possibili diversi tipi di allestimento, quindi può cambiare sostanzialmente il peso. Per questo si è deciso cautelativamente di prendere la versione con il massimo peso al decollo, le cui caratteristiche vengono riportate, insieme alla configurazione del carrello, nelle prossime figure.

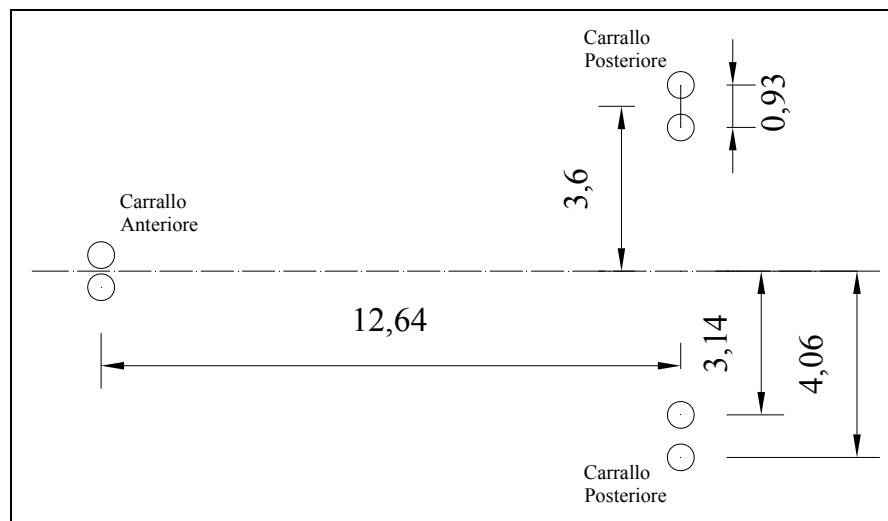


Figura 51: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'A320-200

#### Aircraft Load Ratings for A320-200 (configuration 3)

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 92.7
Load on One Main Gear Leg (%): 46.52	Tire Pressure (MPa): 1.44 (209 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
759	10.4	9.1	9.5	9.8	10.2	9.6	9.9	10.2	10.4
441	8.9	6.9	7.4	7.9	8.9	7.6	7.7	7.8	7.9

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
759	41	42	47	53	46	49	51	53
441	22	22	24	28	24	26	27	28

## A321-200



Figura 52:A321-200 della compagnia Lufthansa

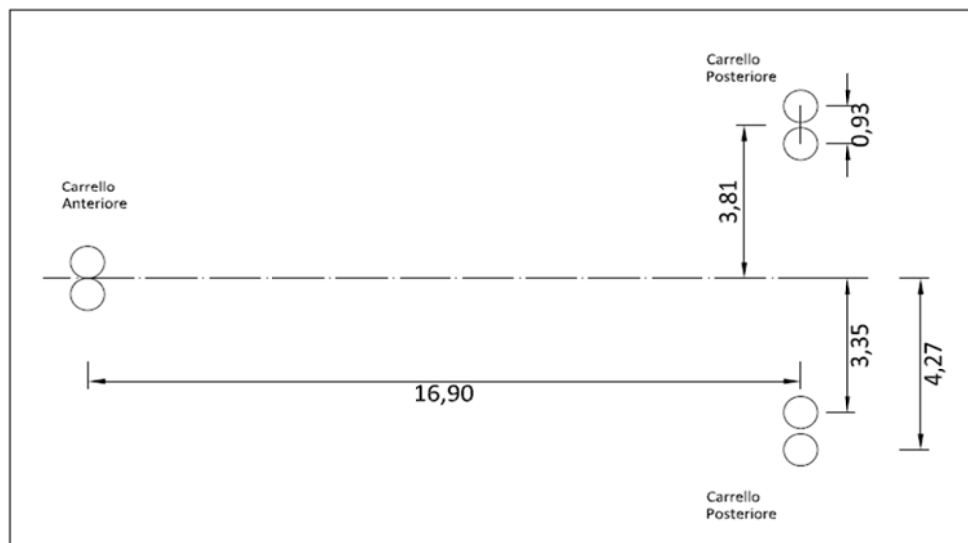


Figura 53:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'A321-200

### Aircraft Load Ratings for A321-200

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 92.7
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.46 (212 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
877	11.1	9.8	10.2	10.5	10.8	10.2	10.5	10.9	11.1
461	9.0	7.1	7.7	8.1	9.0	7.8	8.0	8.1	8.2

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
877	49	52	58	63	56	59	62	64
461	23	24	26	30	26	28	29	31

### A330-200



Figura 54:A330-200 della compagnia Emirates Airlines

Anche per questo velivolo esistono diversi tipi di allestimento. Quello preso in

considerazione prevede le seguenti caratteristiche:

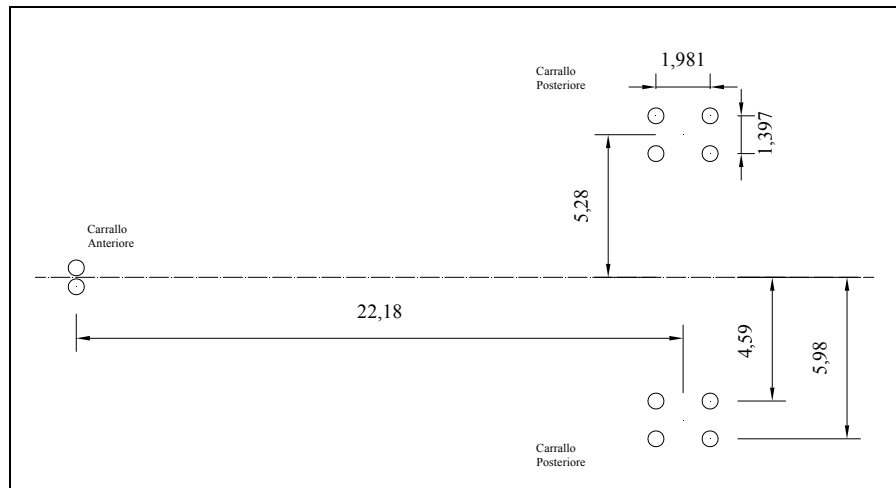


Figura 55: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'A330-200

Aircraft Load Ratings for A330-200 (Configuration 2)

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 4
Main Gear Type: Dual Tandem	Gear Wheel Spacing (cm): Dual = 139.7 Tandem = 198.1
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.42 (206 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
2264	11.3	11.3	11.1	11.1	11.1	11.2	11.1	11.0	11.0
1650	10.3	9.6	9.4	9.3	10.3	9.8	9.7	9.6	9.6

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
2264	62	67	78	106	53	61	73	85
1650	42	45	50	67	37	41	47	55

B737-800



Figura 56: B737-800 della compagnia Ryanair

Il Boeing 737 ha altri tipi di allestimenti, ma tutti sfruttano la medesima configurazione dei carrelli.

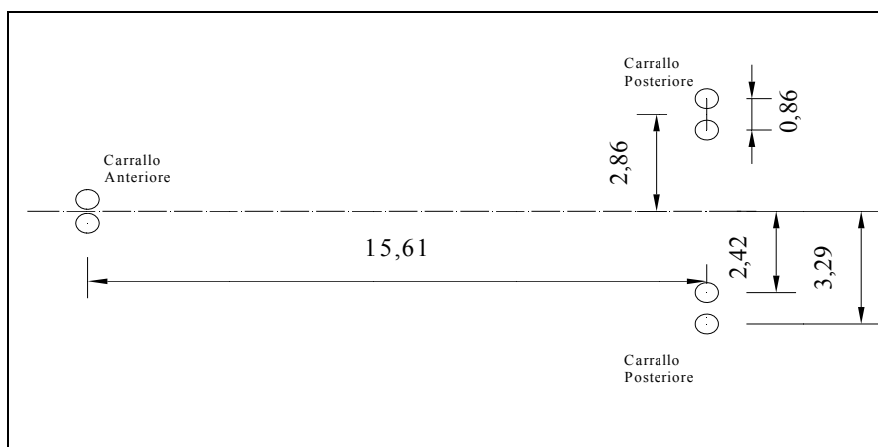


Figura 57: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del B737-800

#### Aircraft Load Ratings for B737-800

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 86.4
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.47 (213 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
777	10.7	9.4	9.8	10.1	10.5	9.9	10.2	10.5	10.7
406	8.9	6.7	7.4	7.8	8.9	7.4	7.6	7.7	7.8

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
777	44	46	51	56	51	53	55	57
406	21	21	23	26	23	25	26	27

### B717



Figura 58: B717 della compagnia Hawaiian

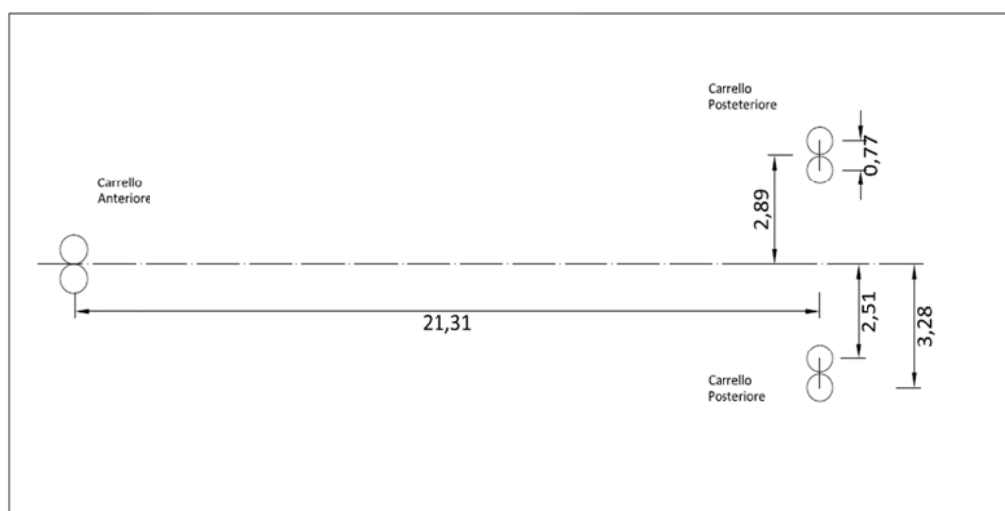


Figura 59: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del B717



### Aircraft Load Ratings for B717

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm):77
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.1(160 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
543	9.4	8.7	8.9	9.2	9.4	8.7	9.0	9.2	10.0
310	7.0	6.4	6.8	7.0		7.4	6.7	6.7	6.9

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
543	32	34	38	40	36	38	40	41
310	16	17	19	22	18	20	21	21

### B757-200



Figura 60: B717-200 della compagnia Aitalia



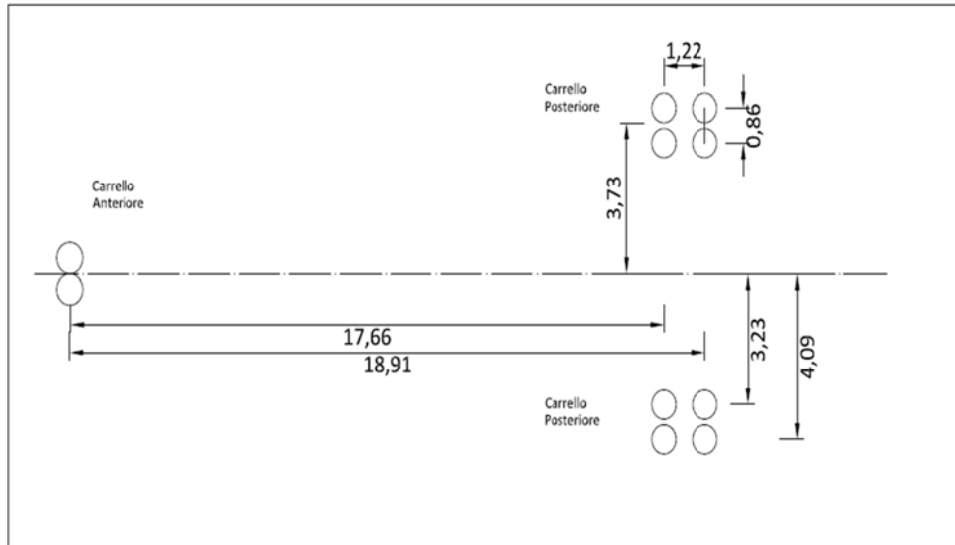


Figura 61:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del B757-200

#### Aircraft Load Ratings for B757-200

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 4
Main Gear Type: Dual Tandem	Gear Wheel Spacing (cm): Dual = 86 Tandem = 122
Load on One Main Gear Leg (%): 45.6	Tire Pressure (MPa): 1.26(183 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
1134	9.6	9.6	9.4	9.2	9.3	9.5	9.5	9.3	9.0
570	6.9	6.1	6.3	6.9		6.5	6.2	5.8	5.6

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A	Medium	Low C	Vr Low	High A	Medium	Low C	Ult Low D
	15	B 10	6	D 3	150	B 80	40	20
1134	34	38	47	60	31	39	45	52
570	14	15	17	23	13	15	18	20

### B767-300



Figura 62: B767-300 della compagnia Air China

Questo è un velivolo che viene inserito all'interno del gruppo definito “Heavy”, infatti la sua massa al decollo si aggira sui 2600 KN, il che induce nella pavimentazione stati tensionali di notevole entità

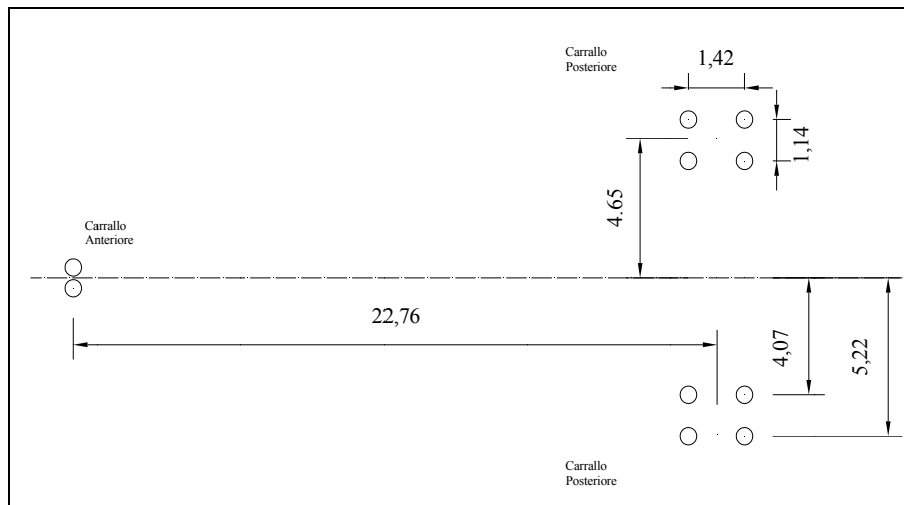


Figura 63: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del B767-300

### Aircraft Load Ratings for B757-200

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 4
Main Gear Type: Dual Tandem	Gear Wheel Spacing (cm): Dual = 114.3 Tandem = 142.2
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.38 (200 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
1784	10.9	10.9	10.8	10.7	10.1	10.9	10.9	10.8	10.6
890	8.0	7.2	7.3	8.0		7.8	7.6	7.4	7.2

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
1784	53	59	72	94	48	57	68	78
890	22	23	26	35	20	23	26	30

ATR-72



Figura 64: ATR-72 della compagnia Alitalia

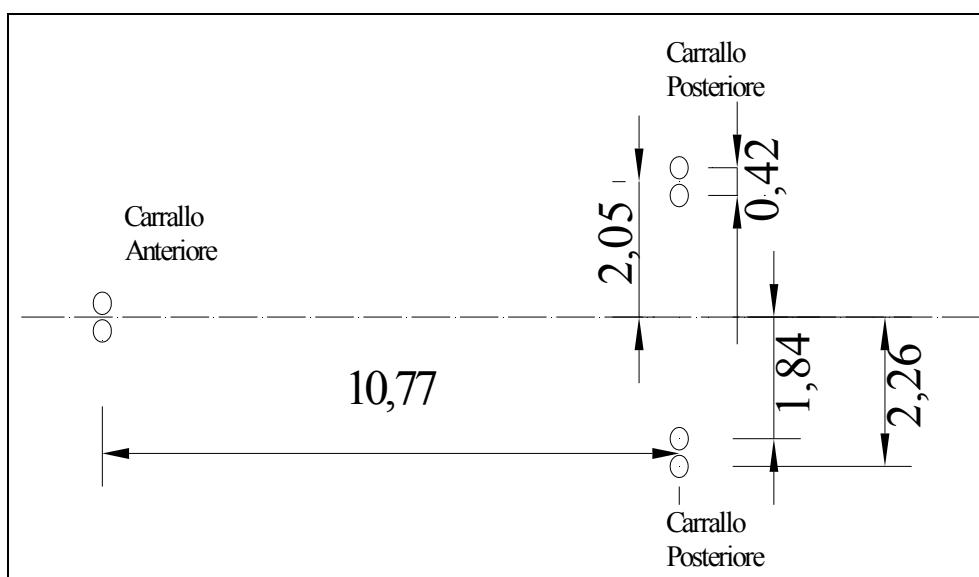


Figura 65:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'ATR-72

#### Aircraft Load Ratings for ATR-72

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 42.0
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 0.79 (114 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
211	5.6	5.5	5.6			5.4	5.4	5.3	5.4
125	3.9	3.9							

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
211	11	12	14	15	13	14	14	15
125	6	6	7	8	7	7	8	8

Embraer 170



Figura 66:Embraer-170 della compagnia Alitalia

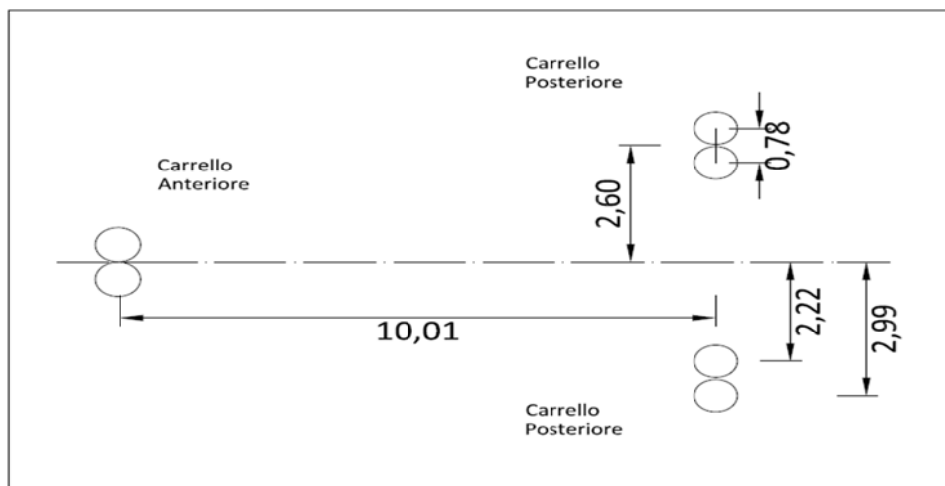


Figura 67:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'Embraer-170

#### Aircraft Load Ratings for Embraer-170

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 78
Load on One Main Gear Leg (%): 48.2	Tire Pressure (MPa):1.13 (164 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
368	7.6	7.1	7.3	7.6		7.2	7.4	7.5	7.5
208	5.5	5.2	5.5			5.1	5.1	5.0	5.0

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
368	20	21	24	26	22	24	25	26
208								

### Embraer 195



Figura 68:Embraer-195 della compagnia Lufthansa

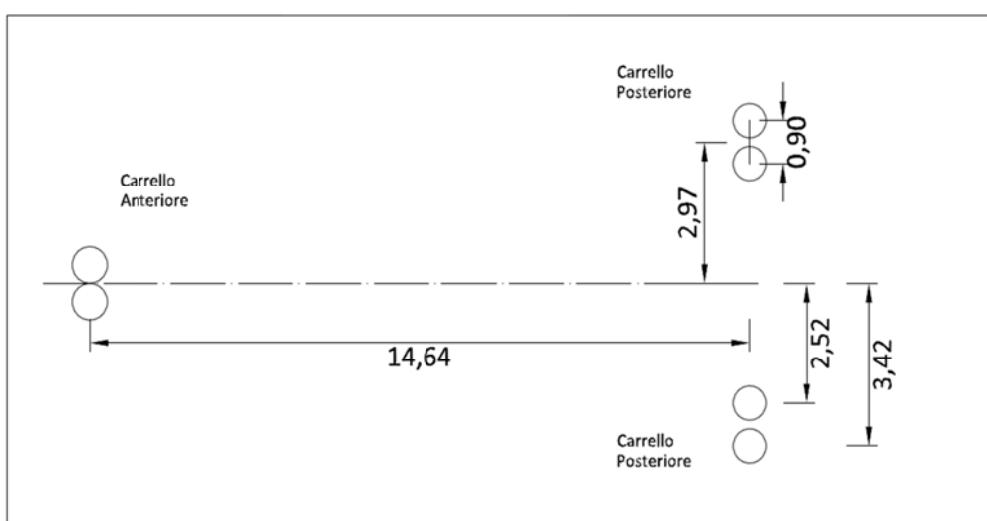


Figura 69:Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio dell'Embraer-195

### Aircraft Load Ratings for Embraer-195

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 90
Load on One Main Gear Leg (%): 48.2	Tire Pressure (MPa):1.13 (164 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
481	8.9	8.2	8.5	8.7	8.9	8.3	8.5	8.7	8.9
266	6.3	5.9	6.3			6.0	6.1	6.1	6.1

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
481	28	30	33	35	31	33	35	36
266								

### MD Serie 80



Figura 70:MD83 della compagnia Spanair

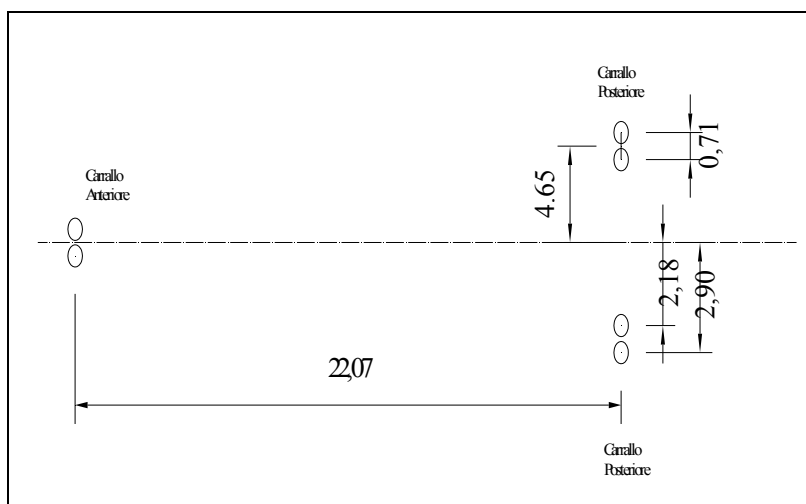


Figura 71: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del MD83

#### Aircraft Load Ratings for MD83

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 2
Main Gear Type: Dual	Gear Wheel Spacing (cm): 71.4
Load on One Main Gear Leg (%): 47.5	Tire Pressure (MPa): 1.14 (165 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
716	10.4	9.6	9.8	10.1	10.3	9.6	9.9	10.2	10.4
355	7.3	6.6	7.0	7.3		6.9	7.1	7.1	7.2

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A	Medium	Low C	Vr Low	High A	Medium	Low C	Ult Low D
	15	B 10	6	D 3	150	B 80	40	20
716	42	45	50	53	47	50	52	54
355	18	19	21	24	20	22	23	24





Figura 72: B777-200 della compagnia Emirates Airlines

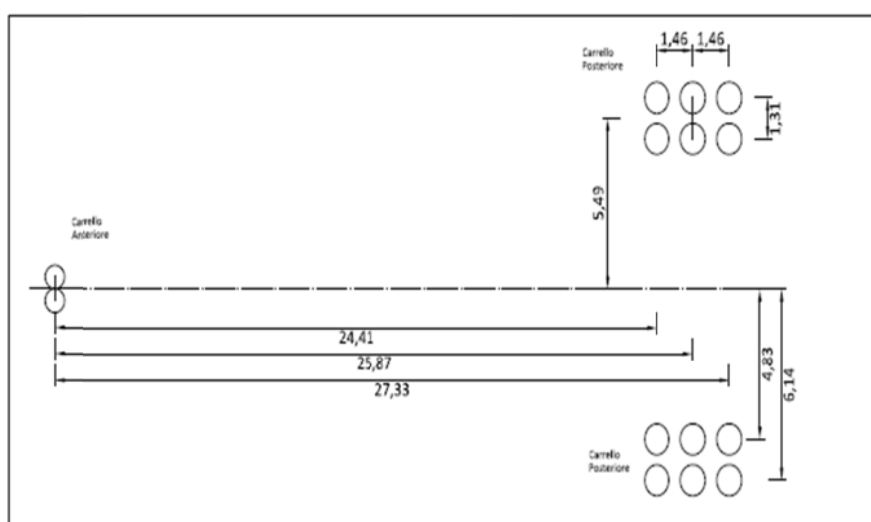


Figura 73: Schema del posizionamento geometrico e della configurazione del carrello di atterraggio del B777-200

#### Aircraft Load Ratings for B777-200

Landing Gear Characteristics	
Number of Main Gear: 2	Wheels In Each Main Gear: 6
Main Gear Type: Dual Tridem	Gear Wheel Spacing (cm): Dual = 131 Tandem = 146 Tridem = 146
Load on One Main Gear Leg (%): 45.9	Tire Pressure (MPa): 1.41(205 psi)

Operating Weight (kN)	Aircraft Load Rating (ALR)								
	Max ALR	Flexible Pavement Subgrades S (kN)				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
		50	90	130	180	20	40	80	150
2389	11.0	11.0	10.1	9.1	10.1	10.9	10.6	10.1	9.7
1355	8.0	7.0	7.1	7.9		8.0	7.5	7.1	7.1

Operating Weight (kN)	Aircraft Classification Number (ACN)							
	Flexible Pavement Subgrades CBR				Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)			
	High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
2389	51	58	71	99	40	50	65	81
1355	25	27	31	43	23	23	28	35

## 5.24 Valutazione della regolarità

Il principale parametro utilizzato per la definizione sintetica del livello di regolarità di una pavimentazione è l'indice IRI (International Roughness Index).

Introdotta in Brasile a seguito delle campagne sperimentali condotte dalla "The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements", World Bank Technical Paper No.45, The World Bank, Washington DC, 1986, la sua determinazione è basata su un'accurata misura del profilo della pavimentazione, su una simulazione numerica attuata mediante un modello matematico di interpretazione meccanica della risposta di un veicolo ideale al profilo longitudinale rilevato, e sul calcolo dell'accumulo dei movimenti effettuati dal sistema di sospensione riportato all'unità di spazio percorso.

La misura dell'IRI è richiesta per i dati prescritti negli United States Federal Highway Administration, ed è coperto in diversi standard di ASTM International: ASTM E1926-08, ASTM E1364-95 (2005), e altri. La valutazione di tale indicatore viene fatta a partire da misure profilometriche, le quali vengono analizzate attraverso una procedura standardizzata riportata da diverse Normative Tecniche sopradette.

Il parametro IRI misura il numero di metri di oscillazione cumulata in un chilometro lineare percorso (m/Km); convenzionalmente si tende a calcolare il parametro IRI su tratte di lunghezza ettometrica, valutando il numero di millimetri di scostamento dal profilo ideale per ogni metro percorso (mm/m), criterio adottato anche per le elaborazioni qui condotte, attraverso una sospensione del veicolo (quarter-car), viaggiando a 80 km/h. L'algoritmo della simulazione quarter car è molto complessa e si trova in appendice di ASTM E1364.

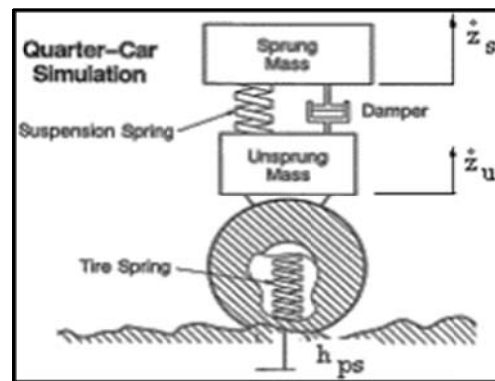


Figura 74: Quarter-Car Simulation

Per l'elaborazione cromatica si è fatto riferimento in questa relazione ad un parametro introdotto dalla Transport Canada Civil Aviation e denominato RCI (Riding Comfort Index) [Aerodrome Standards and Recommended Practices, TP312]. Il parametro valuta, analogamente all'indice IRI, l'entità degli spostamenti relativi fra il telaio e l'assale di un

veicolo (virtuale) che transita sulla superficie della pavimentazione.

La correlazione fra il valore di IRI e quello RCI è stata utilizzata per la definizione delle seguenti soglie e la corrispondente valutazione.

Valore di IRI (mm/m)	Colore	Definizione
$IRI < 2$		Pavimentazione con irregolarità TRASCURABILI
$2 < IRI < 2.7$		Pavimentazione con irregolarità PERCEPIBILI
$2.7 < IRI < 3.1$		Pavimentazione con irregolarità MODERATE
$3.1 < IRI < 3.5$		Pavimentazione con irregolarità ACCENTUATE
$IRI > 3.5$	-	Pavimentazione con irregolarità ELEVATE

Si riporta di seguito il grafico relativo all'analisi percentuale del complesso dei valori di IRI per la pista di volo 07/25.

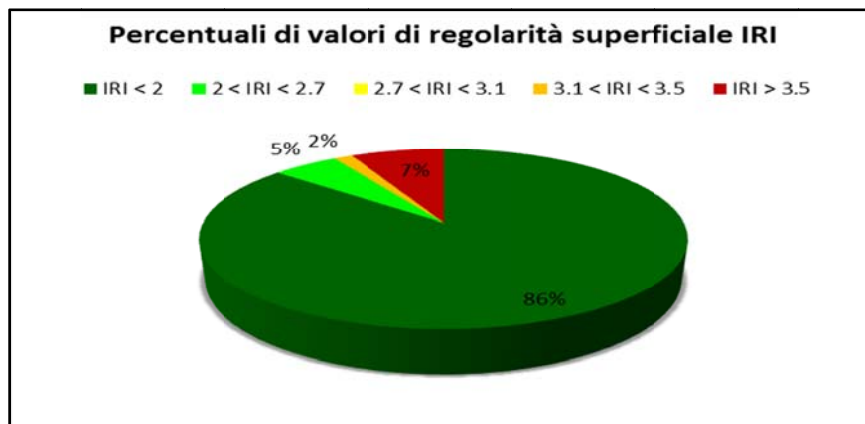


Figura 75:Percentuali di valori di regolarità superficiale IRI

Si riportano di seguito in forma tabellare i valori del parametro IRI.

		L0750	L0375	R0375	R0750
From	To	Center	Left	Right	Center
km	km	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m
0. 000	0. 100	1. 27	1. 63	1. 42	1. 28
0. 100	0. 200	1. 36	1. 55	2. 28	1. 67
0. 200	0. 300	3. 68	4. 09	4. 18	3. 47
0. 300	0. 400	3. 92	4. 30	3. 53	3. 31
0. 400	0. 500	3. 89	4. 20	4. 48	4. 07
0. 500	0. 600	2. 54	2. 65	2. 56	2. 49

0.600	0.700	1.70	1.93	1.40	1.64
0.700	0.800	1.35	1.61	1.54	1.25
0.800	0.900	1.53	1.79	1.53	1.63
0.900	1.000	1.63	1.95	1.46	1.58
1.000	1.100	1.57	1.98	1.45	1.60
1.100	1.200	1.45	2.00	1.70	1.92
1.200	1.300	1.63	1.80	1.72	1.61
1.300	1.400	1.31	1.54	1.59	1.56
1.400	1.500	1.33	1.65	1.44	1.37
1.500	1.600	1.40	1.79	1.37	1.49
1.600	1.700	1.29	1.55	1.27	1.45
1.700	1.800	1.24	1.40	1.55	1.53
1.800	1.900	1.26	1.62	1.70	1.37
1.900	2.000	1.19	1.37	1.37	1.23
2.000	2.100	1.64	1.88	1.33	1.36
2.100	2.200	1.59	1.68	1.51	1.34
2.200	2.300	1.45	1.46	1.65	1.62
2.300	2.400	1.28	1.66	1.61	1.45
2.400	2.500	1.48	1.59	1.51	1.53
2.500	2.600	0.99	1.54	1.75	1.06
2.600	2.700	1.01	1.82	1.95	1.00
2.700	2.800	1.44	1.68	1.56	0.95
2.800	2.900	1.91	2.37	1.95	1.34
2.900	3.000	1.65	1.54	1.93	1.00
3.000	3.100	1.43	1.91	1.61	1.01
3.100	3.200	1.62	1.41	1.75	1.31
3.200	3.300	1.61	1.34	1.63	1.31
3.300	3.345	0.99	1.54	1.75	1.06

Da questi valori del parametro IRI, si può calcolare il valore medio del parametro IRI corrispondente alle diverse sezioni.

- ♦ L'IRI medio nella sezione 1 è 2.11 mm/m
- ♦ L'IRI medio nella sezione 2 è 1.55 mm/m
- ♦ L'IRI medio nella sezione 3 è 1.51mm/m

### 5.25 Determinazione per il livello di ormaimento

L'analisi del profilo trasversale della pavimentazione, acquisito con un sufficiente numero di sensori ottici, consente di individuare la presenza di ormaie e di determinarne la profondità in diverse posizioni rispetto al veicolo utilizzato per il rilievo: due più ristrette

localizzate in prossimità della ruote sinistra e destra del mezzo di rilievo (solitamente denominate wheel-tracks), ed una più ampia che prenda a riferimento tutta la larghezza della barra profilometrica utilizzata per il rilievo.

In fase di analisi, al fine di determinare i valori rappresentativi degli allineamenti critici, in relazione alla posizione rispetto alla center-line dell'allineamento considerato, è stata calcolata la profondità dell'ormaia più rappresentativa, ovvero quella maggiormente transitata dal carrello dell'aeromobile.

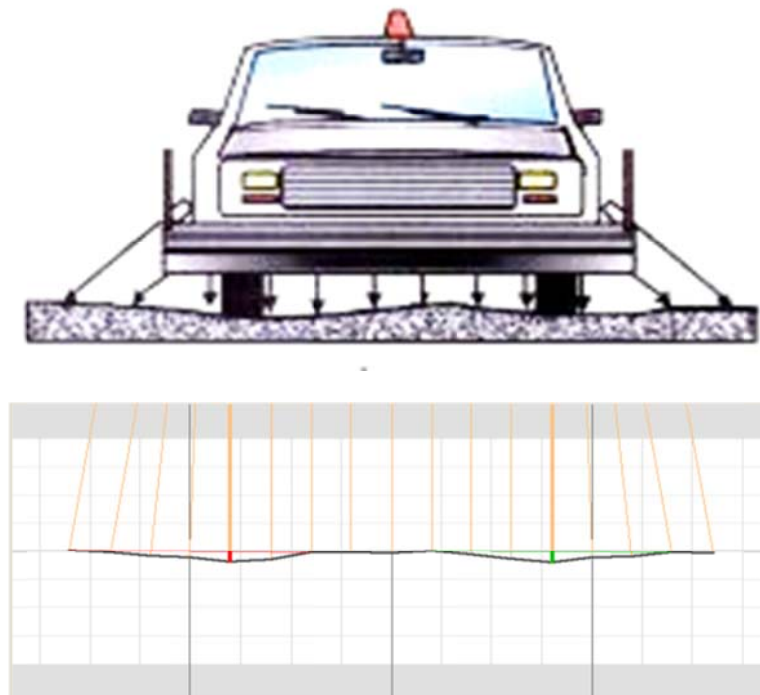


Figura 76: Ormaia rilevata durante le fasi di acquisizione

In accordo con quanto previsto dalla Norma ASTM D5340 (Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys) sono state definite le seguenti soglie per la classificazione e la valutazione dei livelli di ormaiamento rilevati.

Valore di RUT – Rut depth (mm)	Colore	Definizione
$RUT < 12.5$	Verde	Pavimentazione con irregolarità PERCEPIBILI
$12.5 < RUT < 25$	Giallo	Pavimentazione con irregolarità MODERATE
$RUT > 25$	Rosso	Pavimentazione con irregolarità ELEVATE

Si riporta di seguito il grafico relativo all'analisi percentuale del complesso dei valori della profondità dell'ormaia RUT.

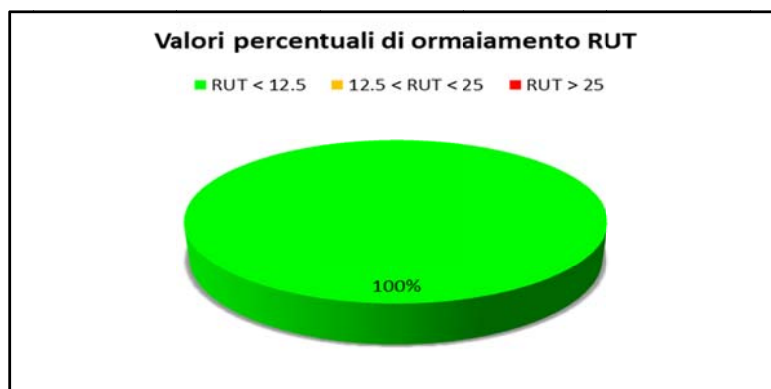


Figura 77:Percentuali di ormaimento RUT

Alla fine si ricava il valore medio di RUT per ogni sezione.

- ♦ Il RUT medio nella sezione 1 è 2.7 mm
- ♦ Il RUT medio nella sezione 2 è 2.4 mm
- ♦ Il RUT medio nella sezione 3 è 3.0 mm

## 5.26 Valutazione del livello di ammaloramento superficiale

L'impiego di telecamere con scansione laser INO LCMS consente di determinare la coordinate geometriche (posizione trasversale e posizione verticale) di 4096 punti su una sezione di larghezza 4m; per ciascun punto si rileva quindi la posizione sull'asse trasversale e la conseguente profondità.

Una volta acquisite queste informazioni grazie all'utilizzo di appositi software è possibile procedere alla determinazione della presenza dell'ammaloramento sulla pavimentazione, e associare alcune informazioni quali la lunghezza, il livello di severità in funzione della larghezza di apertura della fessura e la coordinata GPS. Così si può visualizzare tutte le informazioni sull'immagine.

Contemporaneamente al rilievo geometrico sono acquisite immagini ad alta risoluzione che consentono di sovrapporre il risultato dell'analisi numerica a quella puramente visiva.

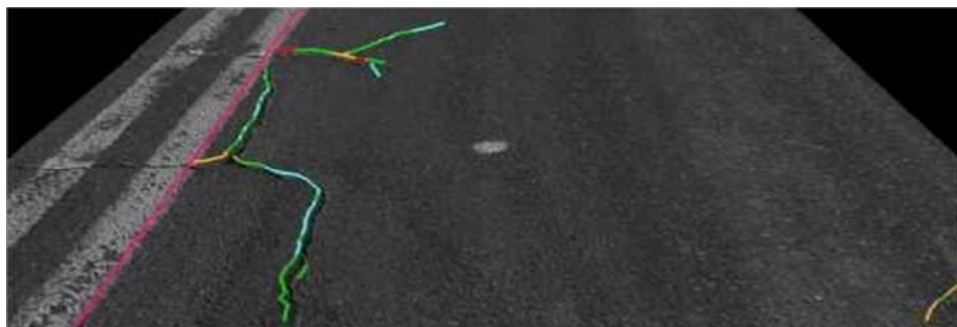


Figura 78:Risultato della prima fase di post-processing delle immagini

Una successiva fase del procedimento avviene all'interno del software Dynatest Explorer, che grazie all'utilizzo dell'applicazione Dynatest Crack Detection (DCD) è in grado di classificare gli ammaloramenti sia di tipo singolare (come fessure lineari longitudinali o trasversali) sia di tipo multiplo (come fessure a pelle di coccodrillo o a blocchi), e distinguere i diversi livelli di severità di fessura con i diversi colori.

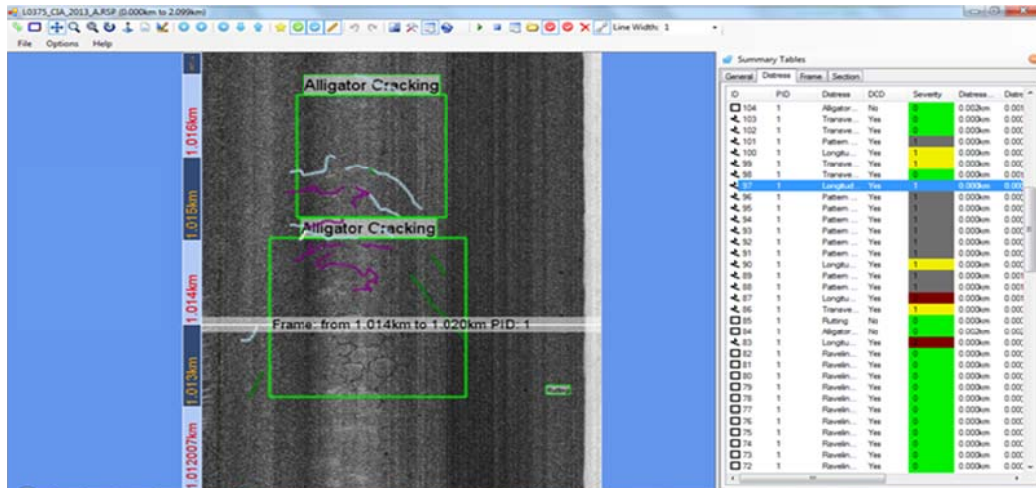


Figura 79: Valutazione degli ammaloramenti eseguita con Dynatest Crack Detection

Dopo le elaborazioni di software, si ricava l'output dell'analisi per l'identificazione degli ammaloramenti, in questo output viene riportato la tipologia d'ammaloramento, il grado di severità, le caratteristiche geometriche, la progressiva di inizio e fine, nonché le coordinate GPS. L'identificazione di ciascun ammaloramento avviene in conformità alla Norma ASTM D5340-11 "Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys", di cui si riporta di seguito l'elenco di dettaglio.

Numero	Ammaloramento
1	Alligator cracking
2	Bleeding
3	Block Cracking
4	Corrugation
5	Depression
6	Jet-Blast Erosion
7	Joint Reflection Cracking
8	Longitudinal and Transversal Cracking
9	Oil Spillage
10	Patching and Utility Cracking
11	Polished Aggregate
12	Raveling
13	Rutting



14	Shoving
15	Slippage Cracking
16	Swell
17	Weathering

Figura 80:Elenco della tipologia di ammaloramenti

Al fine di fornire un parametro semplificato di interpretazione del rilievo condotto è stato determinato il valore del parametro Pavement Condition Index (PCI), la cui procedura di calcolo è riportata all'interno della stessa Norma.

L'obiettivo del PCI è quello di riassumere le condizioni generali della pavimentazione esaminata considerando il tipo, l'estensione e la gravità degli ammaloramenti. I valori di PCI sono compresi tra 0 e 100 che corrispondono rispettivamente alla peggiore ed alla migliore condizione in cui può trovarsi una pavimentazione.

Per l'elaborazione cromatica è stata utilizzata la classificazione riportata nella Normativa Tecnica ASTM D6433 di cui si riportano di seguito le soglie e la corrispondente valutazione.

Valore di PCI	Colore	Definizione
85 < PCI < 100		Pavimentazione in condizioni ECCELLENTI
70 < PCI < 85		Pavimentazione in condizioni MOLTO BUONE
55 < PCI < 70		Pavimentazione in condizioni BUONE
40 < PCI < 55		Pavimentazione in condizioni DISCRETE
25 < PCI < 40		Pavimentazione in condizioni SCADENTI
10 < PCI < 25		Pavimentazione in condizioni MOLTO SCADENTI
0 < PCI < 10		Pavimentazione in condizioni PESSIME

Si riporta di seguito il grafico relativo alla distribuzione percentuale dei valori di Pavement Condition Index (PCI).

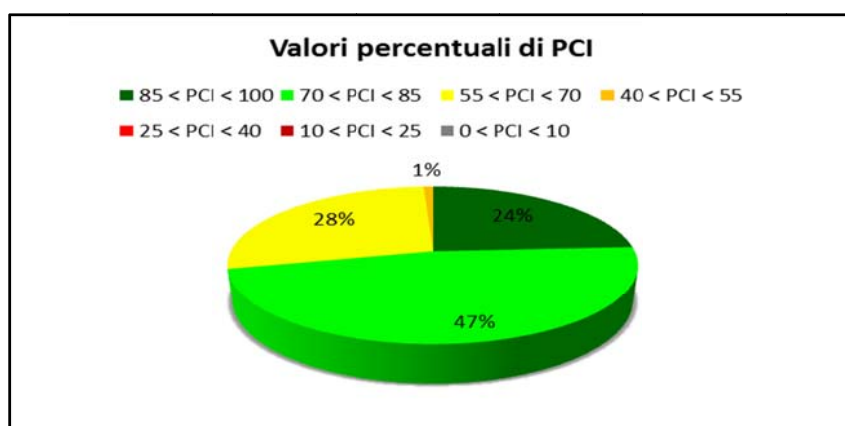


Figura 81:Percentuali di PCI

Si riporta di seguito il dettaglio dei valori di PCI determinati.

Progressiva		PCI	
Da (km)	A (km)	LEFT	RIGHT
0.000	0.060	63.1	72.7
0.060	0.120	63.8	75.6
0.120	0.180	78.4	73.9
0.180	0.240	80.1	86.6
0.240	0.300	87.0	100.0
0.300	0.360	100.0	97.5
0.360	0.420	96.0	97.5
0.420	0.480	100.0	100.0
0.480	0.540	75.3	77.1
0.540	0.600	77.6	68.0
0.600	0.660	64.5	66.2
0.660	0.720	76.1	64.1
0.720	0.780	64.3	60.2
0.780	0.840	78.7	61.5
0.840	0.900	72.7	63.8
0.900	0.960	69.2	60.5
0.960	1.020	75.5	63.8
1.020	1.080	72.8	64.3
1.080	1.140	66.6	65.4
1.140	1.200	49.6	64.3
1.200	1.260	81.3	74.8
1.260	1.320	82.4	71.4
1.320	1.380	76.6	69.1
1.380	1.440	74.7	71.5
1.440	1.500	73.7	69.7
1.500	1.560	72.3	70.3
1.560	1.620	68.2	73.4
1.620	1.680	65.7	71.4
1.680	1.740	68.0	74.0
1.740	1.800	71.3	80.6
1.800	1.860	66.4	75.5
1.860	1.920	75.8	65.2
1.920	1.980	70.8	75.3
1.980	2.040	70.2	87.3
2.040	2.100	69.0	80.1
2.100	2.160	76.6	80.0
2.160	2.220	71.6	80.7
2.220	2.280	71.5	83.5
2.280	2.340	75.0	72.1

2. 340	2. 400	81. 5	73. 5
2. 400	2. 460	74. 5	70. 4
2. 460	2. 520	71. 1	74. 8
2. 520	2. 580	63. 2	79. 8
2. 580	2. 640	69. 9	86. 4
2. 640	2. 700	71. 8	96. 0
2. 700	2. 760	66. 2	91. 4
2. 760	2. 820	78. 1	92. 8
2. 820	2. 880	69. 0	100. 0
2. 880	2. 940	75. 5	92. 5
2. 940	3. 000	77. 5	96. 0
3. 000	3. 060	94. 8	87. 3
3. 060	3. 120	100. 0	100. 0
3. 120	3. 180	96. 0	100. 0
3. 180	3. 240	100. 0	91. 8
3. 240	3. 300	68. 9	92. 0
3. 300	3. 360	69. 7	86. 0

Da questi valori nei ogni progressiva, si ricava il valore medio di PCI per ogni sezione.

- ♦ Il PCI medio nella sezione 1 è 71.1
- ♦ Il PCI medio nella sezione 2 è 69.9
- ♦ Il PCI medio nella sezione 3 è 78.2

### 5.3 Elaborazione con LCCA

Per utilizzare il modulo LCCA, si deve creare un nuovo database LCCA a partire dai rilievi mediante FWD, elaborati tramite un processo backcalculation (utilizzando il software ELMOD 6).

Per creare un database LCCA, si devono impostare tutti i dati che abbiamo rilevato dai test, dati input.

#### Dati delle informazioni generali per ciascuna sezione

Per questi dati si devono registrare le informazioni utili della struttura della pavimentazione, includendo il nome dell'infrastruttura, la tipologia (piste, vie di rullaggio, e piazzali), il nome, la lunghezza, la larghezza e la tipologia di pavimentazione della sezione (flessibile, rigida, semirigida), com'è illustrato nella figura 82.

Facility	Section Code	Link
RWY 07_25 3.5mL	Section 1	1
RWY 07_25 3.5mL	Section 1.1	5
RWY 07_25 3.5mL	Section 2.1	6
RWY 07_25 3.5mL	Section 2	2
RWY 07_25 3.5mL	Section 3	3
RWY 07_25 3.5mL	Section 3.1	7

Search: Front  All  F3: Find next

Group Update

General Traffic Structure Surface JCP Costs Models Other

Facility name: RWY 07\_25 3.5mL

Section Name: Section 1.1

Direction:  Lane: 1 Grouped Lanes: 1

Area Name: District 1

Section Description:

Pavement Type: Asphalt

From (km): 5 To (km): 7 Facility type: Runway

Length (m): 200 Width (m): 15 Area (sqm): 3000

Notes:

Analyze from: 2016

Save

Measured values are:

☒ Respected

☐ Neglected

Clear

Save as New Section

Delete

Cancel

Save

Figura 82: Impostazione generale per una sezione

### Dati di traffico per ciascuna sezione

Una volta raccolti i dati relativi al traffico annuo per ogni sezione in esame, il programma, grazie ad un modello, riesce a prevedere il traffico futuro. I dati ottenuti sono quindi relativi a ciascuna pavimentazione, come si osserva nella figura 83.

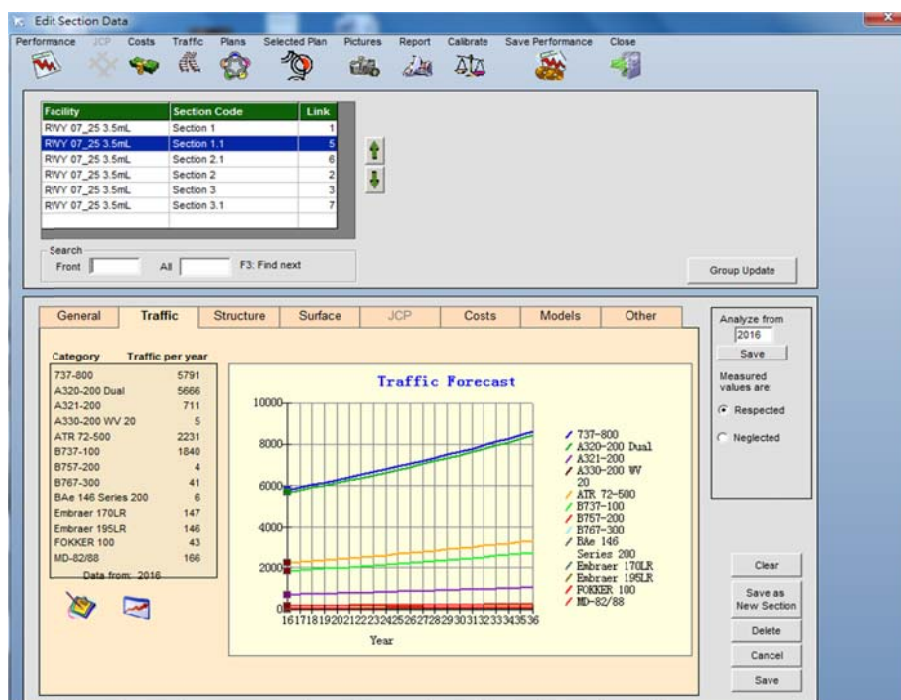


Figura 83: Impostazione dei dati di traffico

### Dati della struttura per ciascuna sezione

Per i dati della struttura, si deve impostare lo spessore, il materiale e il modulo elastico di ciascuno strato. I dati dello spessore vengono raccolti dal GPR (Ground Penetrating Radar) e i moduli elastici vengono stimati dal processo di Backanalysis raccogliendo i dati dal FFWD (Fast Falling Weight Deflectometer).

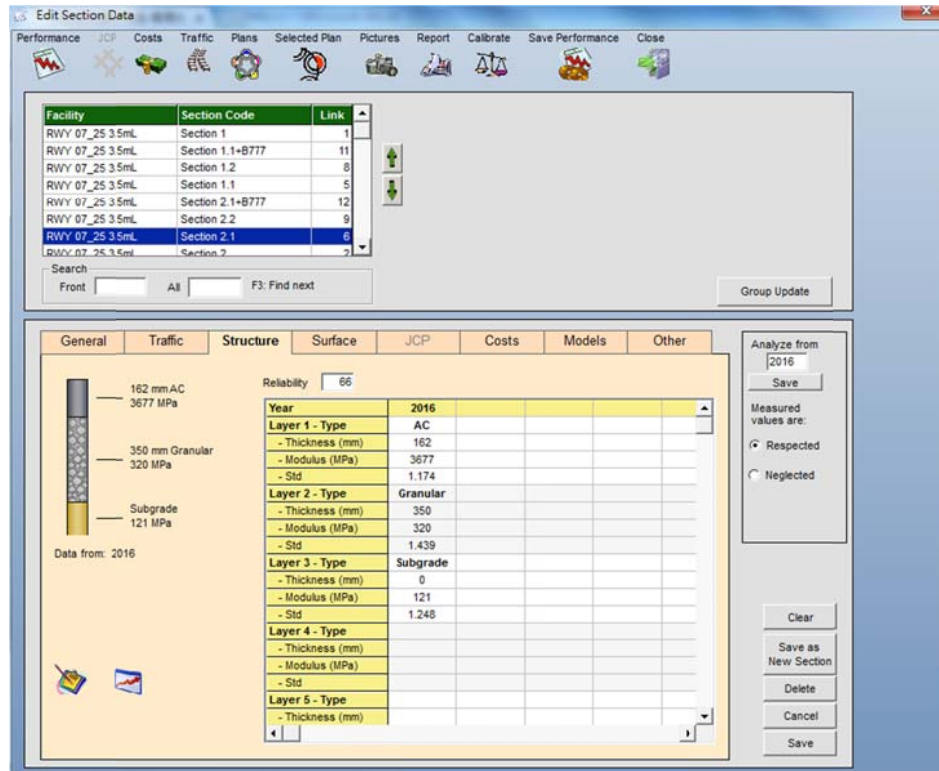


Figura 84: Impostazione dei dati della struttura

### Dati delle condizioni superficiali

I dati riferiti alle condizioni superficiali contengono 3 indicatori:

- ♦ IRI (International Roughness Index)
- ♦ RD (Rut Depth)
- ♦ PCI (Pavement Condition Index)

L'IRI viene calcolato dal profilo longitudinale; il RUT è ricavato dal profilo trasversale ed il PCI viene stimato con riferimento al numero di ammaloramenti presenti, alla tipologia e alla severità di ognuno di essi, raccogliendo i dati attraverso il Multi Functional Vehicle (MFV) dotato del High-Speed Runway Surface Profiler (RSP) e del Laser Crack Measurement System (LCMS).

Figura 85: Impostazione dei dati delle condizioni superficiali

### Dati del materiale da utilizzare

Si devono impostare tutti i materiali da utilizzare per la realizzazione dell'intervento manutentivo in funzione dei parametri meccanici (modulo elastico, coefficiente di poisson) e dei fattori ambientale (soprattutto per il conglomerato bituminoso). Il programma è capace di predire la prestazione del materiale tramite un modello di degrado del materiale, che è funzione dei decrementi di modulo, della rugosità, delle ormarie e del numero di passaggi ammissibili di carico.

Figura 86: Parametri del conglomerato bituminoso

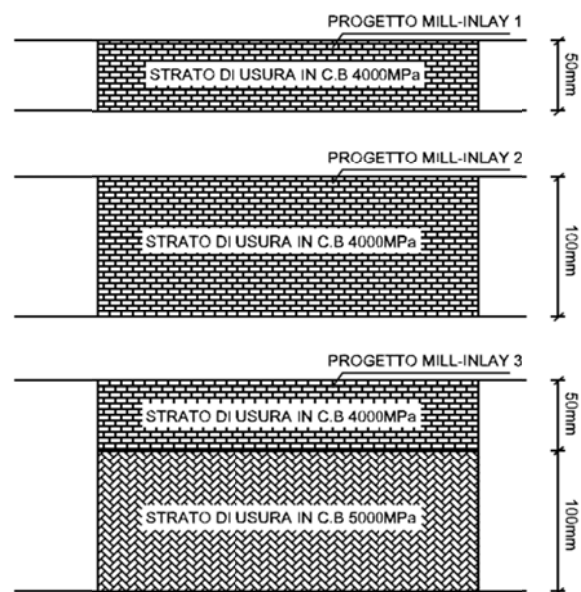
### Dati delle alternative d'intervento

Il programma pianifica una strategia di Manutenzione & Riabilitazione in modo ragionevole e economico, inserendo le diverse alternative d'intervento con i relativi prezzi e le modalità della realizzazione.

Nel presente Tesi sono state considerate 4 tipologie d'intervento:

#### 1. **Intervento superficiale** (Mill-Inlay.1, Mill-Inlay.2, Mill-Inlay.3)

Esso si riferisce ad una pavimentazione esistente la cui fondazione è ancora caratterizzata da una buona qualità strutturale, ma necessita di qualche lavoro di riabilitazione sugli strati più superficiali. Spesso si possono raggiungere ottimi risultati con gli interventi superficiali "Mill-Inlay". Questo tipo d'intervento consiste nella fresatura dello strato di usura preesistente (ed eventualmente, in base al degrado, anche dello strato di collegamento) per rimuovere gli eventuali ammaloramenti, le ormaie e le imperfezioni e nella sostituzione con un nuovo strato (o con nuovi strati).



The screenshot shows the 'Parameters' window of a software application. The 'progetto' tab is selected, and the 'Alternatives' sub-tab is active. The 'Select alternative' list on the left includes 'AsphaltRehab.', 'HeavyRehab.1', 'HeavyRehab.2', 'HeavyRehab.3', 'Mill.inlay.1', 'Mill.inlay.2', 'Mill.inlay.3', and 'Subgrade.Stab.'. The 'Mill.inlay.1' alternative is selected. The 'Alternative name' is 'Mill.inlay.1'. The 'Price total' is 11.05 Eur/sqm and the 'Price WC' is 10.5 Eur/sqm. The 'Expected life' is 12 years. The 'Material' is 'AC 4000MPa' and the 'Thickness' is 50 mm. The 'Valid for' options are 'Asphalt' (checked), 'CRCP', 'PCC jointed', and 'Gravel'. The 'Improve' section shows 'IRI' with a 'with' value of 3 mm/m and a 'Limit' of 2.5 mm/m. The 'Friction' is 40 and the 'Rut depth' is 20 mm. The 'PCI' is 40. The 'Construction time' is 0 Days/km. The 'Preparatory surface repair' is 0 % and the 'Preparatory structural repair' is 0 %.

Figura 87:Esempio di Mill & Inlay 1



Parameters

Select setup to edit  
 progetto  
 Standard\_Si

progetto

Material Types	Alternatives	Repairs	Cost Models	Limits & Models
Select alternative <input checked="" type="checkbox"/> AsphaltRehab. <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.1 <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.2 <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.3 <input checked="" type="checkbox"/> Mill.Inlay.1 <input checked="" type="checkbox"/> <b>Mill.Inlay.2</b> <input checked="" type="checkbox"/> Mill.Inlay.3 <input checked="" type="checkbox"/> Subgrade.Stab.  Doubleclick to enabled/disable Create new alternative Delete current alternative	Alternative name Mill.Inlay.2  Expected life 13 years Thickness removed 100 mm Improve with IRI 3 mm/m Friction 40 Rut depth 20 mm PCI 40 Construction time 0 Days/km Preparatory surface repair 0 % Preparatory structural repair 0 %	Material Layer 1 AC 4000MPa Layer 2 Layer 3 Layer 4 Valid for <input checked="" type="checkbox"/> Asphalt <input type="checkbox"/> CRCP <input type="checkbox"/> PCC jointed <input type="checkbox"/> Gravel	Price total 22.1 Eur/sqm Price WC 21 Eur/sqm	Save as new permanent Setup Delete Cancel Save as new Setup Save Setup

Figura 88:Esempio di Mill & Inlay 2

## 2. Intervento semistrutturale (Asphalt Rehabilitation)

L'intervento consiste nella rimozione degli strati di usura, collegamento e base della pavimentazione esistente e nella loro ricostruzione con strati in conglomerato bituminoso. Gli spessori di intervento generalmente sono dell'ordine dei 20 cm.



Parameters

Select setup to edit  
 progetto  
 Standard\_Si

progetto

Material Types	Alternatives	Repairs	Cost Models	Limits & Models
Select alternative <input checked="" type="checkbox"/> <b>AsphaltRehab.</b> <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.1 <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.2 <input checked="" type="checkbox"/> HeavyRehab.3 <input checked="" type="checkbox"/> Mill.Inlay.1 <input checked="" type="checkbox"/> Mill.Inlay.2 <input checked="" type="checkbox"/> Mill.Inlay.3 <input checked="" type="checkbox"/> Subgrade.Stab.  Doubleclick to enabled/disable Create new alternative Delete current alternative	Alternative name AsphaltRehab.  Expected life 14 years Thickness removed 250 mm Improve with IRI 3 mm/m Friction 40 Rut depth 20 mm PCI 40 Construction time 0 Days/km Preparatory surface repair 0 % Preparatory structural repair 0 %	Material Layer 1 AC 4000MPa Layer 2 AC 5000MPa Layer 3 AC 4000MPa Layer 4 Valid for <input checked="" type="checkbox"/> Asphalt <input type="checkbox"/> CRCP <input type="checkbox"/> PCC jointed <input type="checkbox"/> Gravel	Price total 40.85 Eur/sqm Price WC 10.5 Eur/sqm	Save as new permanent Setup Delete Cancel Save as new Setup Save Setup

Figura 89:Esempio di riabilitazione



### 3. Intervento strutturale (Heavy Rehalitation)

L'intervento consiste nella rimozione di tutti gli strati fino allo strato di fondazione e nella ricostruzione con strati in conglomerato bituminoso e strato di sottobase in misto cementato, o bitume schiumato, o emulsione bituminosa.

The screenshot shows the 'Parameters' window with the 'progetto' setup selected. The 'Alternatives' tab is active, displaying the 'HeavyRehab.1' alternative. The 'Material Types' list on the left includes 'AsphaltRehab.', 'HeavyRehab.1', 'HeavyRehab.2', 'HeavyRehab.3', 'Mill.Inlay.1', 'Mill.Inlay.2', 'Mill.Inlay.3', and 'Subgrade.Stab.'. The 'HeavyRehab.1' alternative is selected, showing a price total of 48.57 Eur/sqr and a price WC of 10.5 Eur/sqm. The 'Expected life' is set to 14 years. The 'Material' and 'Thickness' table is as follows:

Layer	Material	Thickness
Layer 1	AC 4000MPi	50 mm
Layer 2	AC 5000MPi	80 mm
Layer 3	AC 4000MPi	120 mm
Layer 4	Cem.Stab.St	250 mm

The 'Thickness removed' is 270 mm. The 'Valid for' section includes checkboxes for 'Asphalt' (checked), 'CRCP', 'PCC jointed', and 'Gravel'. The 'Improve' section includes fields for 'IRI' (3 mm/m), 'Friction' (40), 'Rut depth' (20 mm), and 'PCI' (40). The 'Limit' section includes fields for 'IRI' (8 mm/m), 'Friction' (90), 'Rut depth' (1 mm), and 'PCI' (90). The 'Construction time' is 0 Days/km. The 'Preparatory surface repair' and 'Preparatory structural repair' are both 0 %.

Figura 90:Esempio di riabilitazione profonda

### 4. Stabilizzazione a calce del sottofondo

L'intervento consiste nella rimozione di tutti gli strati della pavimentazione esistente e nella ricostruzione con stabilizzazione a calce del sottofondo

The screenshot shows the 'Parameters' window with the 'progetto' setup selected. The 'Alternatives' tab is active, displaying the 'Subgrade.Stab.' alternative. The 'Material Types' list on the left includes 'AsphaltRehab.', 'HeavyRehab.1', 'HeavyRehab.2', 'HeavyRehab.3', 'Mill.Inlay.1', 'Mill.Inlay.2', 'Mill.Inlay.3', and 'Subgrade.Stab.'. The 'Subgrade.Stab.' alternative is selected, showing a price total of 70.45 Eur/sqr and a price WC of 10.5 Eur/sqm. The 'Expected life' is set to 14 years. The 'Material' and 'Thickness' table is as follows:

Layer	Material	Thickness
Layer 1	AC 4000MPi	50 mm
Layer 2	AC 4400MPi	200 mm
Layer 3	Foam Stab	300 mm
Layer 4	Lime Stab.St	400 mm

The 'Thickness removed' is 550 mm. The 'Valid for' section includes checkboxes for 'Asphalt' (checked), 'CRCP', 'PCC jointed', and 'Gravel'. The 'Improve' section includes fields for 'IRI' (3 mm/m), 'Friction' (40), 'Rut depth' (20 mm), and 'PCI' (40). The 'Limit' section includes fields for 'IRI' (8 mm/m), 'Friction' (80), 'Rut depth' (1 mm), and 'PCI' (90). The 'Construction time' is 0 Days/km. The 'Preparatory surface repair' and 'Preparatory structural repair' are both 0 %.

Figura 90:Eempio di stabilizzazione a calce del sottofondo

## 5.4 Risultati dell'analisi LCCA

Tramite il modulo LCCA, inserendo i dati del traffico, i dati del materiale, i dati della struttura, i dati delle condizioni superficiali della pavimentazione (IRI, RUT, PCI) e progettando le alternative delle manutenzioni che sono elencate, si può trovare l'alternativa di manutenzione più economica per ogni sezione.

### Sezione 1

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
65169	47286	2025	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.2
73254	54109	2024	Mill.Inlay.2	2033	Mill.Inlay.1
74423	55553	2023	Mill.Inlay.2	2033	Mill.Inlay.1
75448	63884	2022	Mill.Inlay.1	2030	Mill.Inlay.3
77072	77190	2026	Mill.Inlay.3		
77595	65129	2021	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.3
77858	65682	2020	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.3
80764	67665	2019	Mill.Inlay.1	2028	Mill.Inlay.3
81779	69010	2018	Mill.Inlay.1	2028	Mill.Inlay.3
85623	71906	2017	Mill.Inlay.1	2027	Mill.Inlay.3

Dalla tabella possiamo vedere tutti i costi totali delle alternative e tutti gli interventi che possono essere effettuati nel tempo. Quindi la prima alternativa ha il suo costo totale più basso, per cui nel 2025 si effettuerà l'intervento "Mill. Inlay. 1" e nel 2032 si effettuerà un intervento "Mill. Inlay. 2". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica



Figura 91: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 1

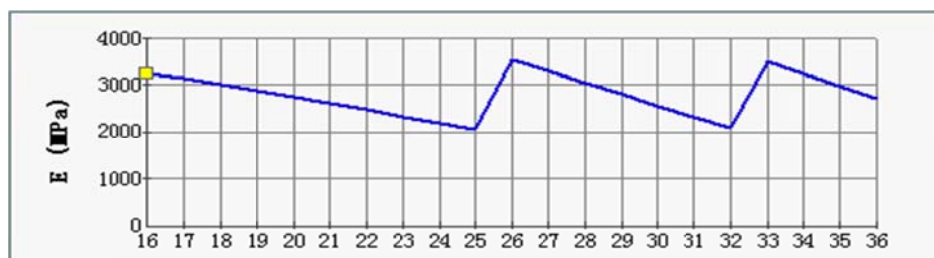


Figura 92: Andamento del modulo elastico dello strato superficiale dovuto all'intervento nella sezione 1

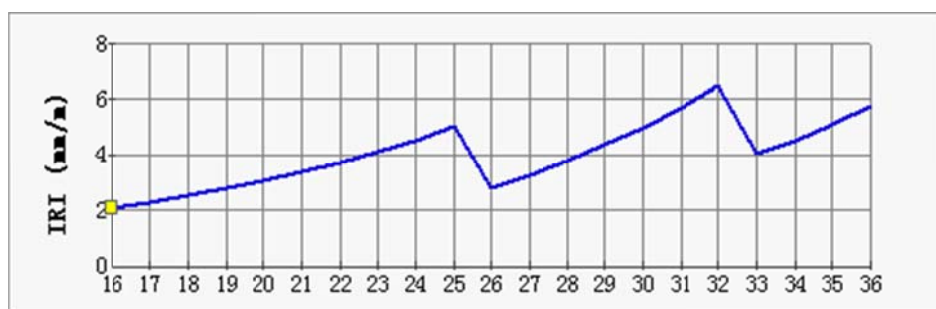


Figura 93: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 1

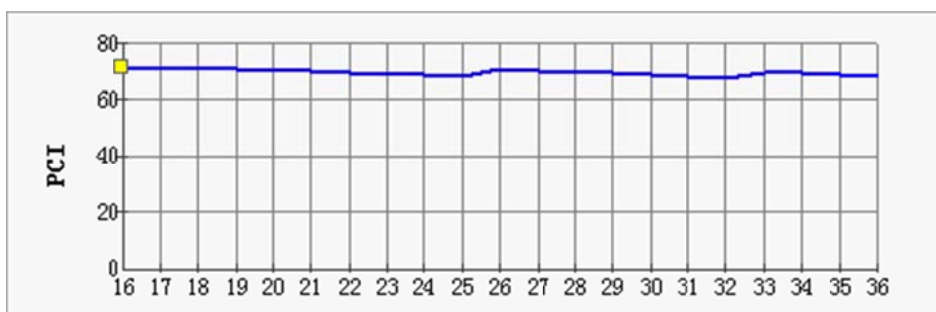


Figura 94: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 1

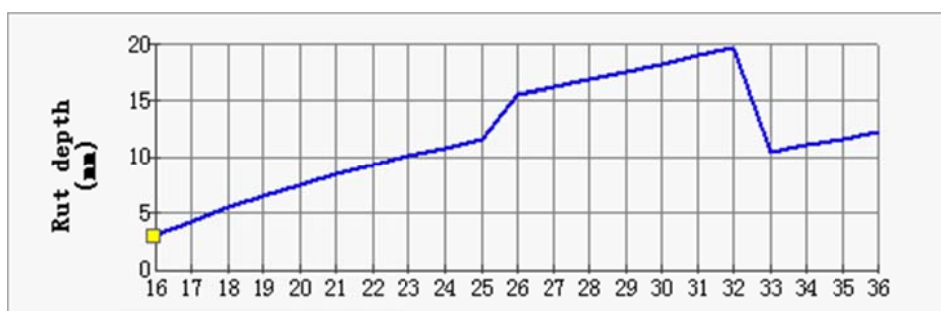


Figura 95: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 1

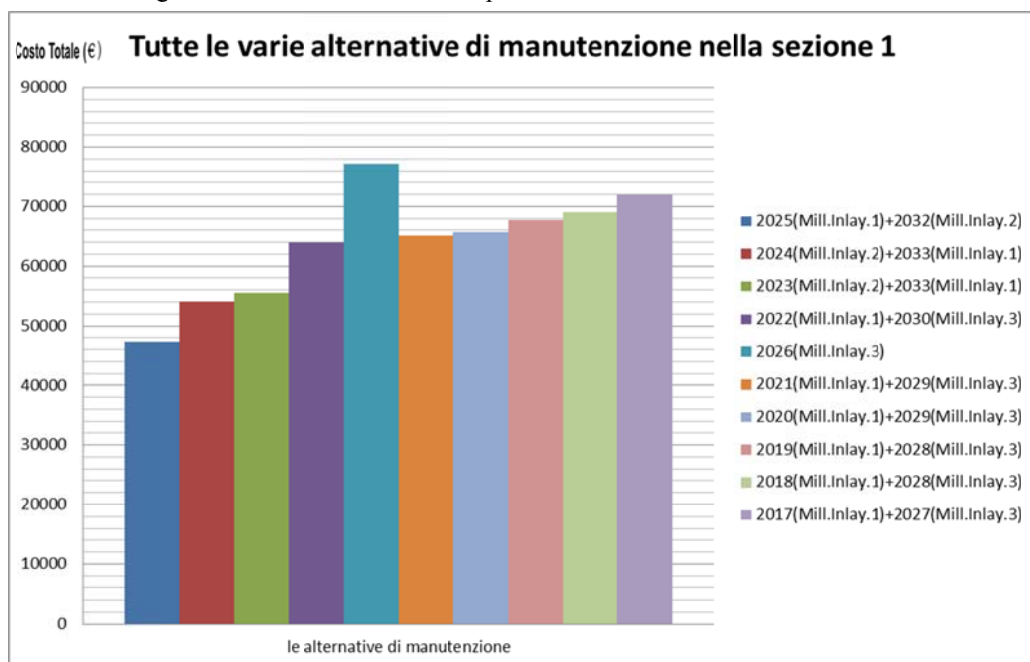


Figura 96: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 1

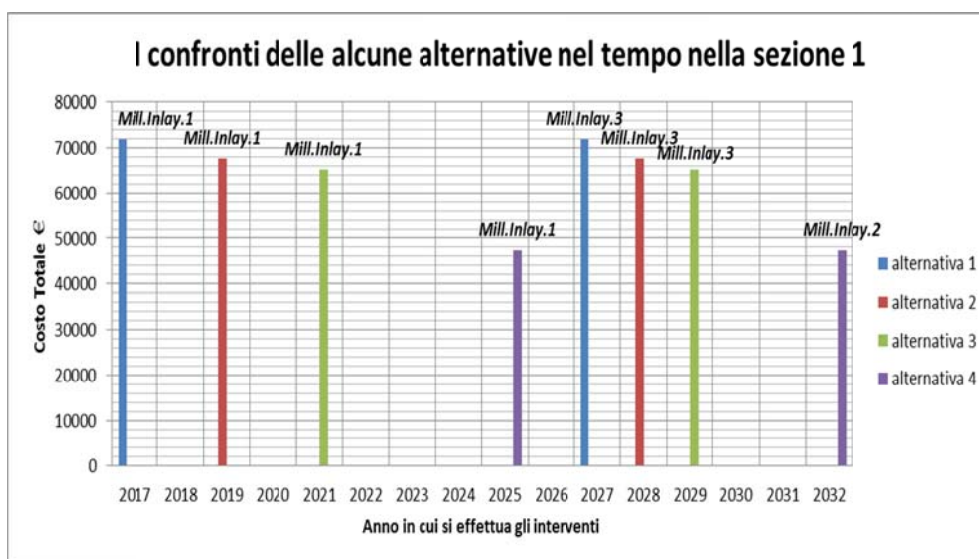


Figura 97: Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 1

## Sezione 2

Agency	Total	Year	Action	Year	Action	Year	Action
313744	258845	2021	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.1		
314001	260891	2023	Mill.Inlay.1	2033	Mill.Inlay.1		
314166	262535	2022	Mill.Inlay.1	2033	Mill.Inlay.1		
316889	267013	2024	Mill.Inlay.1	2034	Mill.Inlay.1		
317569	264399	2020	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.1		
319557	268436	2025	Mill.Inlay.1	2034	Mill.Inlay.1		
320427	263961	2019	Mill.Inlay.1	2031	Mill.Inlay.1		
324250	276344	2026	Mill.Inlay.1	2035	Mill.Inlay.1		
325168	265239	2018	Mill.Inlay.1	2030	Mill.Inlay.1		
387037	271077	2017	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.1	2036	Mill.Inlay.1

Dalla tabella possiamo vedere che la prima alternativa ha il costo più basso, per cui nel 2021 si effettuerà l'intervento "Mill. Inlay. 1" e nel 2032 si effettuerà un intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici delle prestazioni principali della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 2.

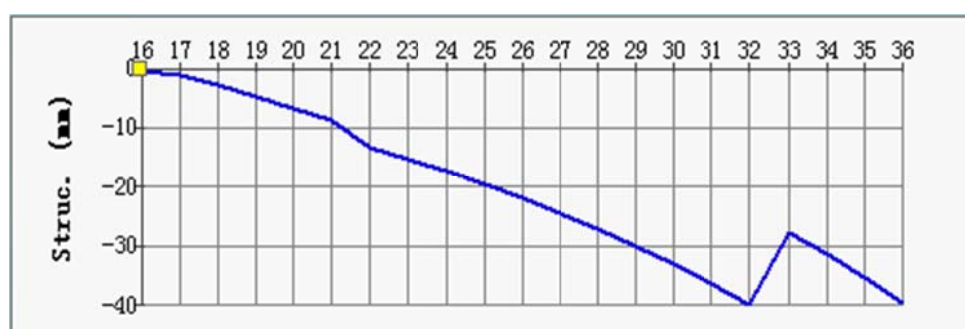


Figura 98: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 1



Figura 99: Andamento del modulo elastico dello strato superficiale dovuto all'intervento nella sezione 2

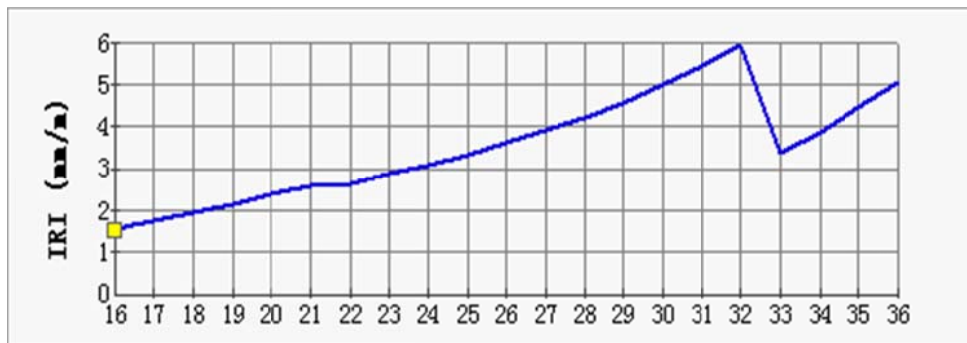


Figura 100: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 2

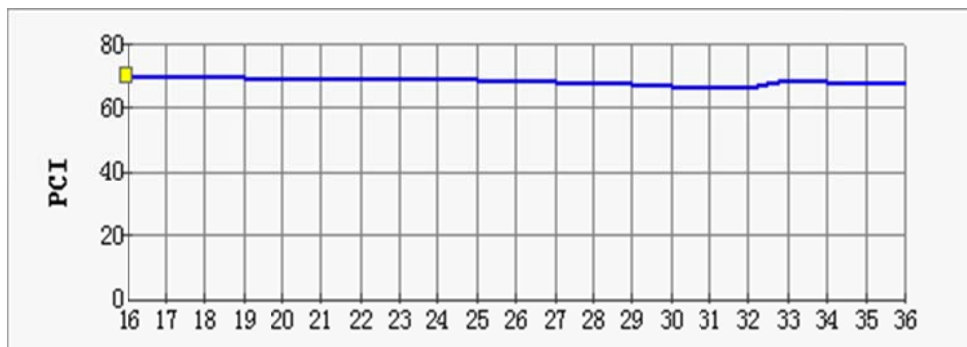


Figura 101: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 2

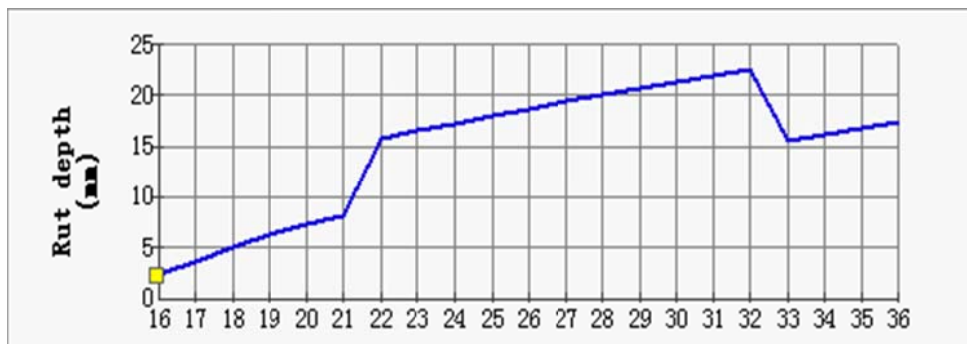


Figura 102: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 2

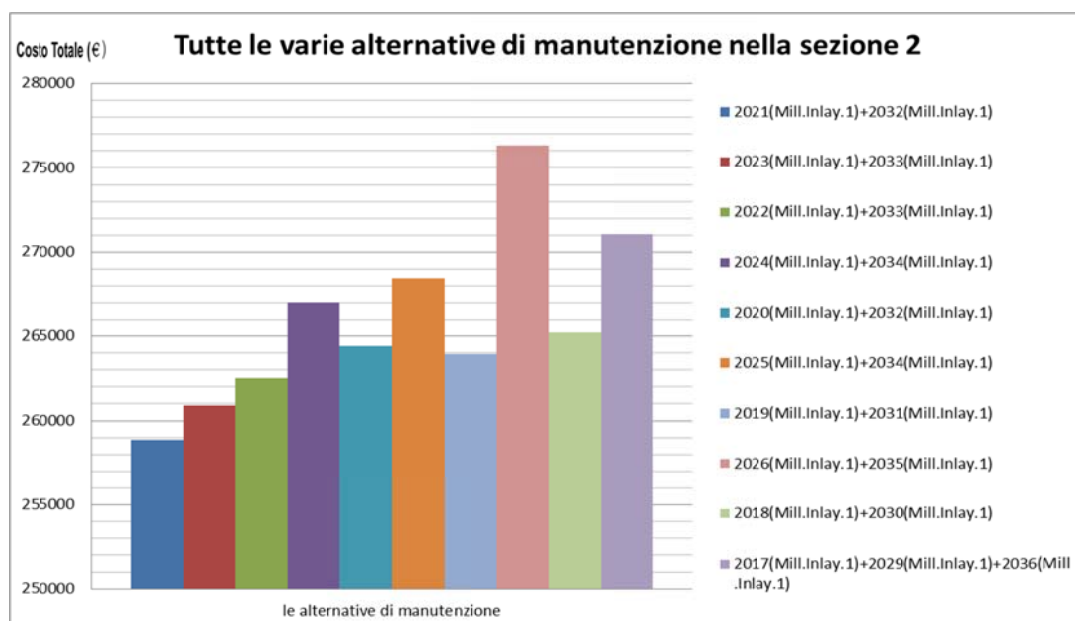


Figura 103:Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 2

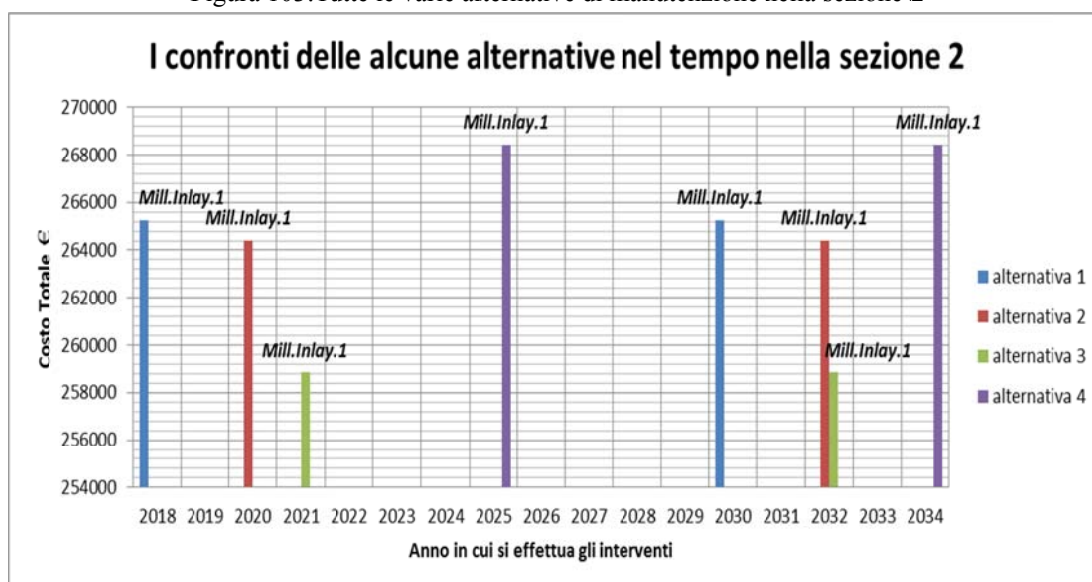


Figura 104:Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 2

### Sezione 3

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
250176	224977	2025	Mill.Inlay.1		
252477	226260	2026	Mill.Inlay.1		
290003	210894	2021	Mill.Inlay.1	2033	Mill.Inlay.1
290233	213645	2022	Mill.Inlay.1	2034	Mill.Inlay.1
291105	209301	2020	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.1
291623	217394	2023	Mill.Inlay.1	2035	Mill.Inlay.1
293725	209039	2019	Mill.Inlay.1	2031	Mill.Inlay.1
294022	222002	2024	Mill.Inlay.1	2036	Mill.Inlay.1
298070	210301	2018	Mill.Inlay.1	2030	Mill.Inlay.1
307678	216591	2017	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.1



Dalla tabella possiamo vedere che la settima alternativa prevede i costi più bassi, per cui nel 2019 si effettuerà l'intervento "Mill. Inlay. 1" e nel 2031 si effettuerà un intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 3.

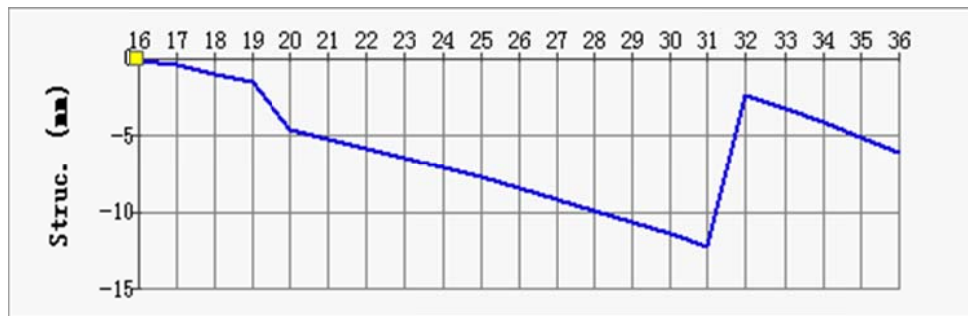


Figura 105: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 3

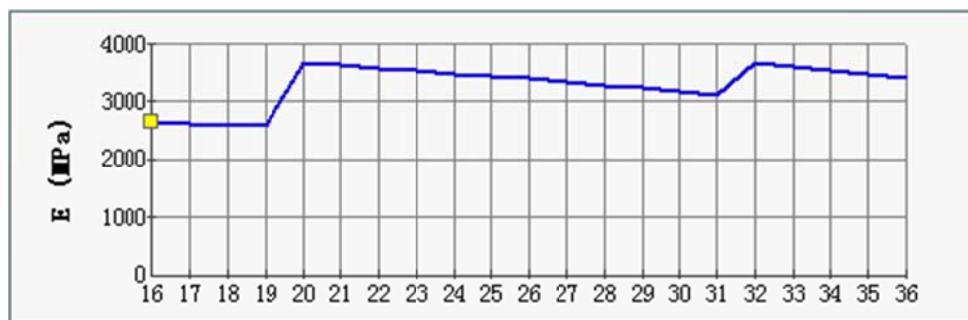


Figura 106: Andamento del modulo elastico dello strato superficiale dovuto all'intervento nella sezione 3

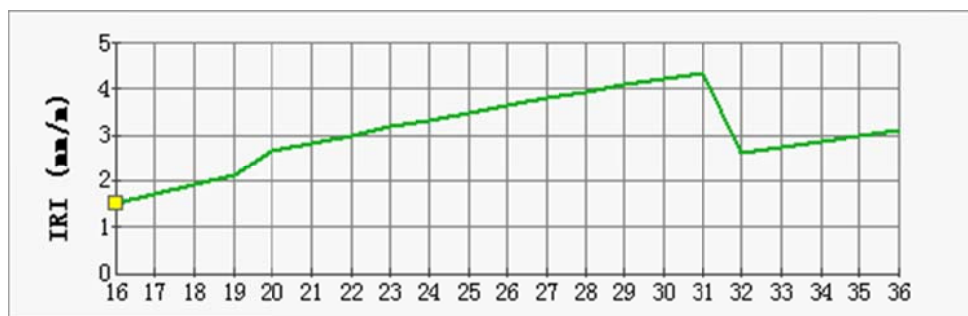


Figura 107: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 3

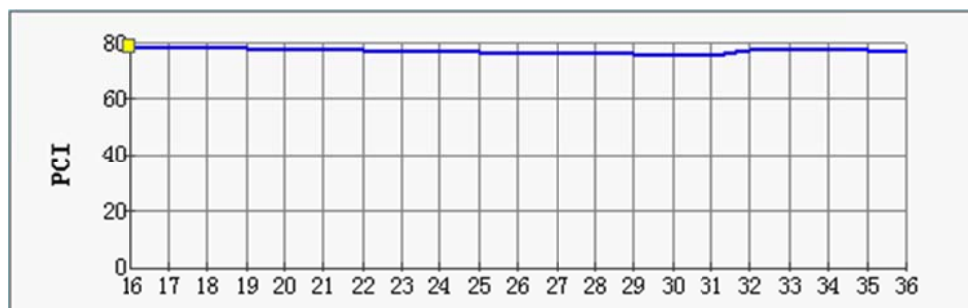


Figura 108: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 3

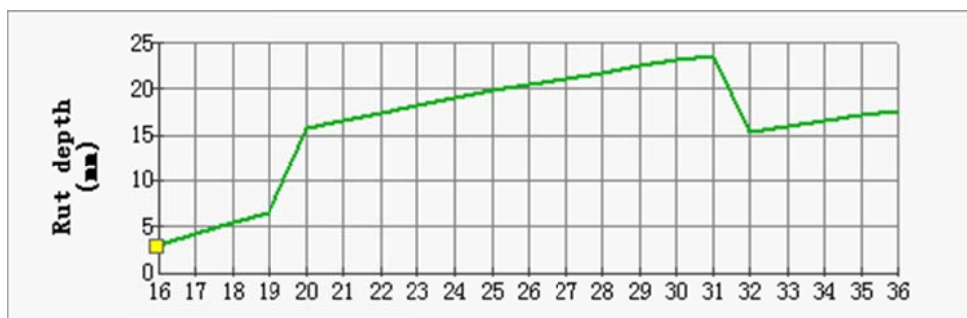


Figura 109: Andamento del Rut Depth dovuto all'intervento nella sezione 3

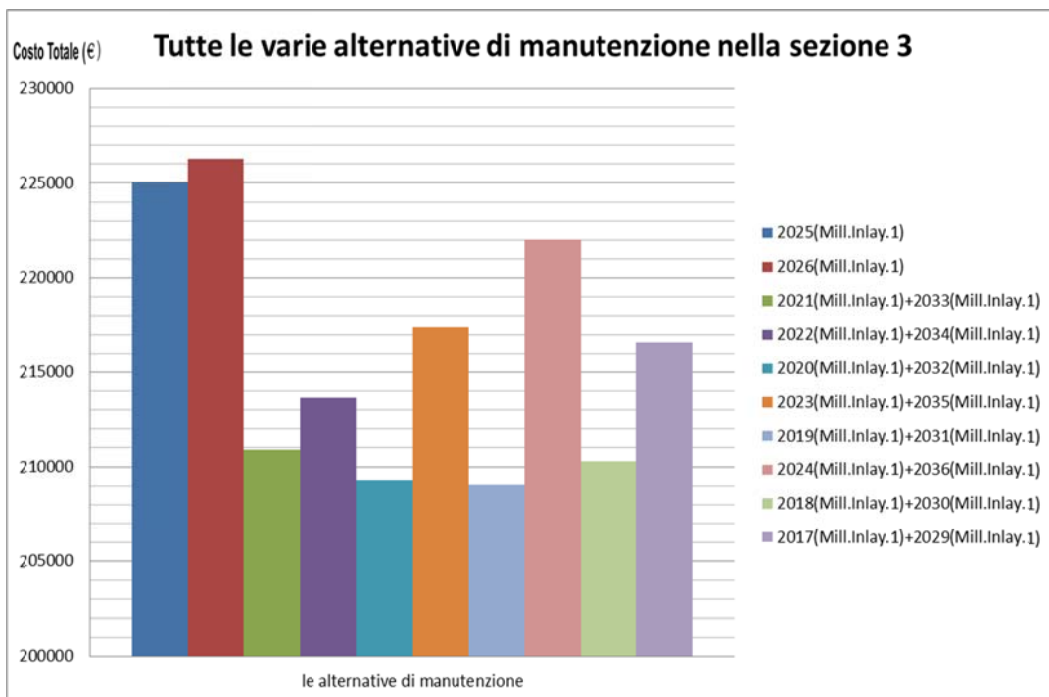


Figura 110: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 3

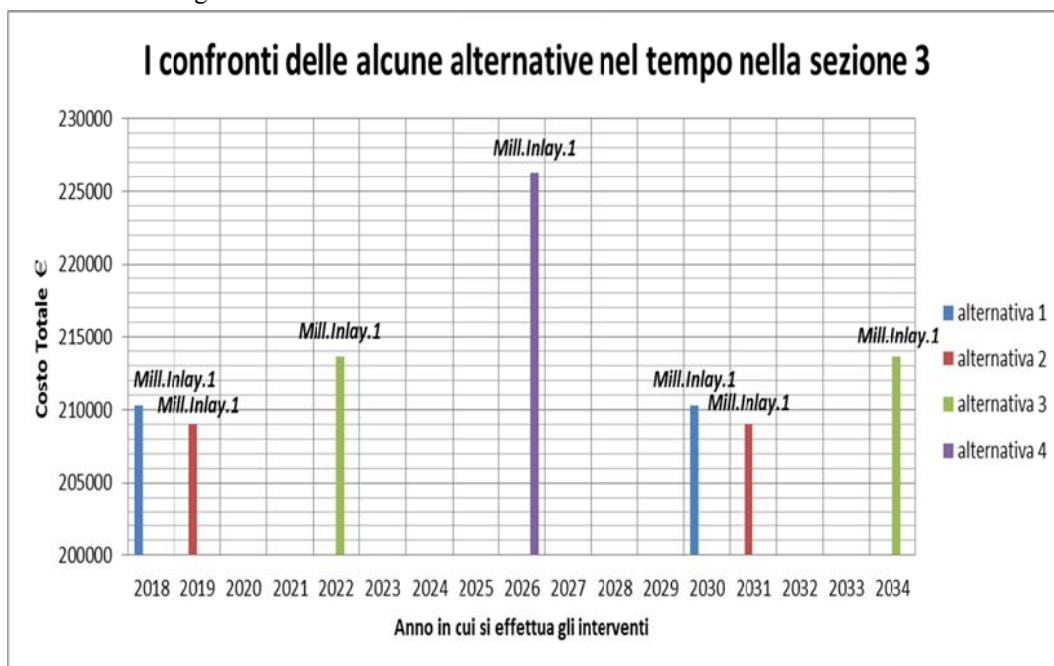


Figura 111: Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 3



## 5.5 Risultati con il doppio traffico

Assumendo l'ipotesi che prevede che il traffico venga raddoppiato, sono stati ricalcolati i risultati con il modulo LCCA al fine di confrontare 2 risultati differenti causati dai diversi input di traffico ed osservare quindi l'influenza del traffico sulla prestazione della pavimentazione e il costo dell'intervento.

### Sezione 1

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
117522	109580	2022	Asphalt Rehab	2036	Mill Inlay 1
122013	112349	2021	Asphalt Rehab	2035	Mill Inlay 1
127063	115831	2020	Asphalt Rehab	2034	Mill Inlay 1
132729	119961	2019	Asphalt Rehab	2033	Mill Inlay 1
139072	124770	2018	Asphalt Rehab	2032	Mill Inlay 1
146158	130307	2017	Asphalt Rehab	2031	Mill Inlay 1

Dalla tabella possiamo vedere che la prima alternativa ha il costo più basso, però il costo è aumentato di circa il 132%, ben più del doppio rispetto al costo totale alla condizione del traffico normale. Sono infatti necessari degli interventi più onerosi di "Asphalt Rehabilitation", che prevedono dapprima di rimuovere la parte superiore del pacchetto di conglomerato bituminoso, e la sua ricostruzione. Per cui nel 2022 si prevede di effettuare un intervento di "Asphalt Rehab" mentre nel 2036 un intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 1.

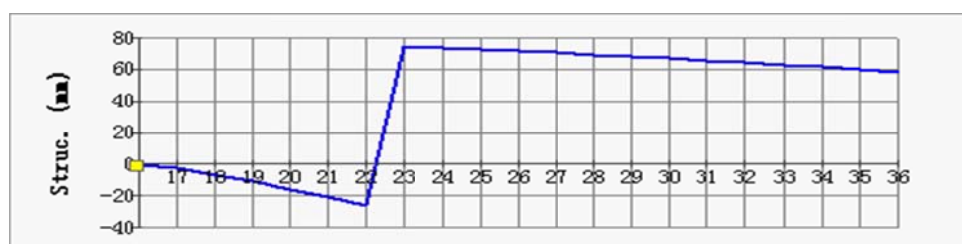


Figura 112: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 1 con il traffico doppio



Figura 113: Andamento del modulo elastico dello strato superficiale dovuto all'intervento nella sezione 1 con il traffico doppio

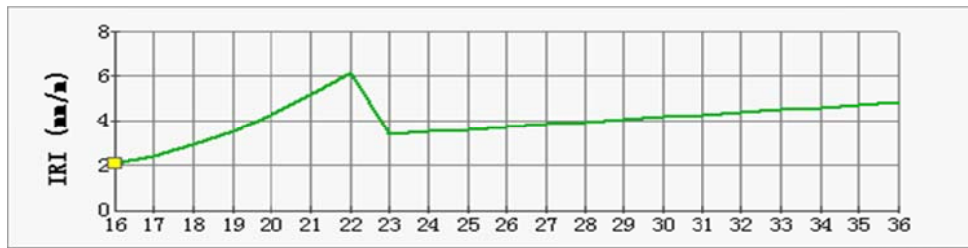


Figura 114: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 1 con il traffico doppio

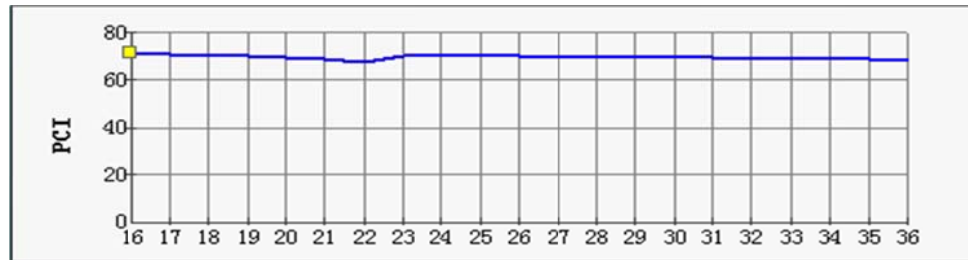


Figura 115: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 1 con il traffico doppio

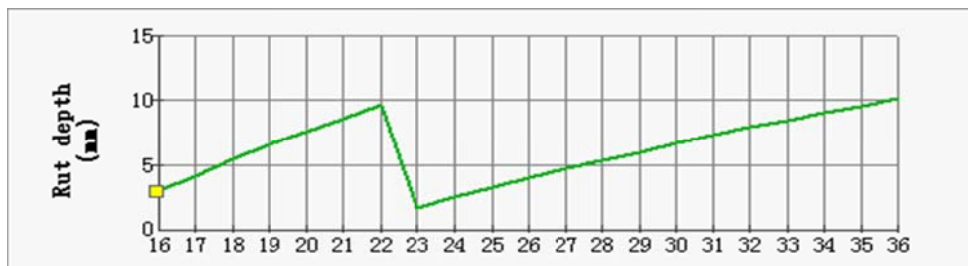


Figura 116: Andamento dell'Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 1 con il traffico doppio

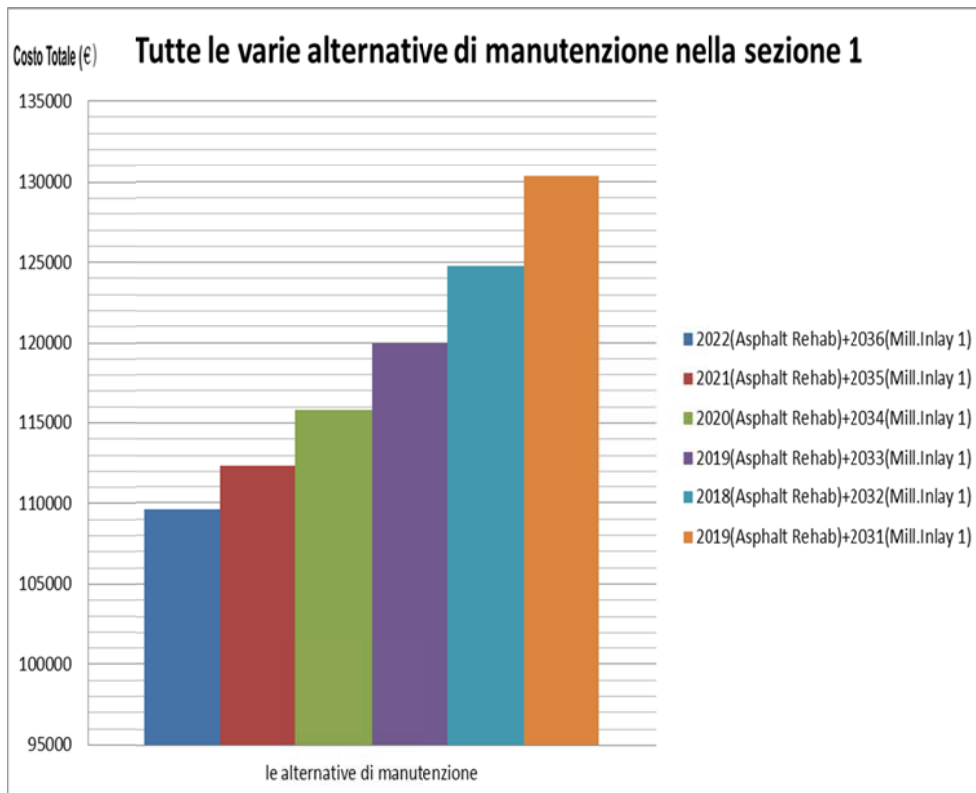


Figura 117: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 1 con il traffico doppio

## Sezione 2

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
585109	604198	2025	Asphalt Rehab		
605894	617494	2024	Asphalt Rehab		
629832	635245	2023	Asphalt Rehab		
654778	569793	2018	Mill. Inlay. 1	2025	Asphalt Rehab
690820	592670	2017	Mill. Inlay. 1	2024	Asphalt Rehab
705131	652836	2022	Asphalt Rehab	2036	Mill Inlay. 1
732077	671484	2021	Asphalt Rehab	2035	Mill Inlay. 1
762378	693583	2020	Asphalt Rehab	2034	Mill Inlay. 1
771881	614729	2019	Mill. Inlay. 2	2027	Asphalt Rehab

Dalla tabella possiamo vedere che la quarta alternativa ha il costo più basso, anche nel questo caso il costo è aumentato di circa il 120%, ben più del doppio rispetto al costo totale alla condizione di traffico normale. Come nella prima sezione sono necessari degli interventi più onerosi di “Asphalt Rehabilitation”. L’intervento prevede infatti di effettuare un intervento “Mill. Inlay. 1” nel 2018 e poi un intervento “Asphalt Rehab” nel 2025. Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all’alternativa di manutenzione più economica nella sezione 2.

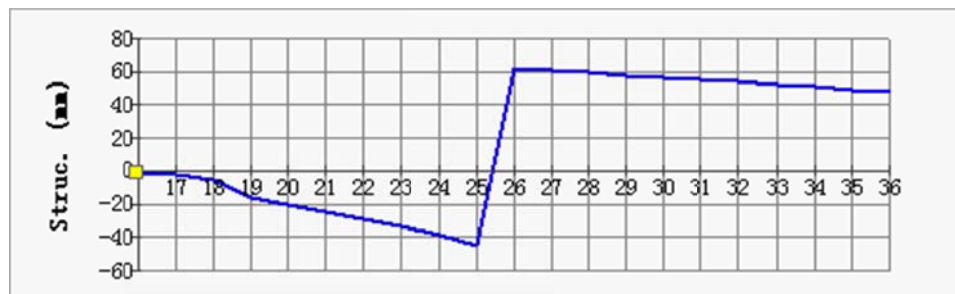


Figura 118: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all’intervento nella sezione 2 con il traffico doppio



Figura 119: Andamento del modulo elastico dovuto all’intervento nella sezione 2 con il traffico doppio

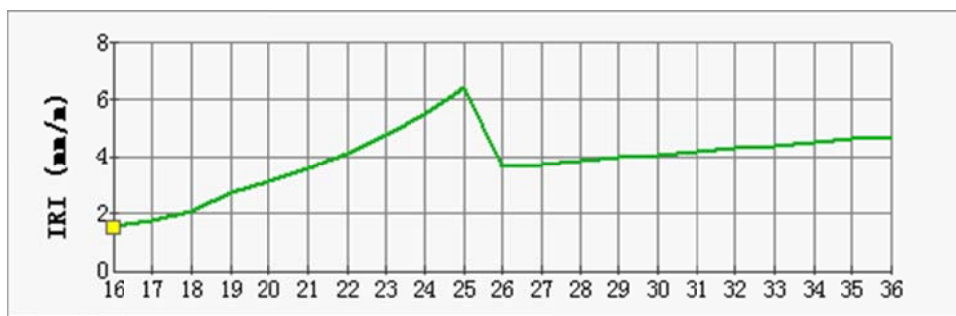


Figura 120: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 2 con il traffico doppio

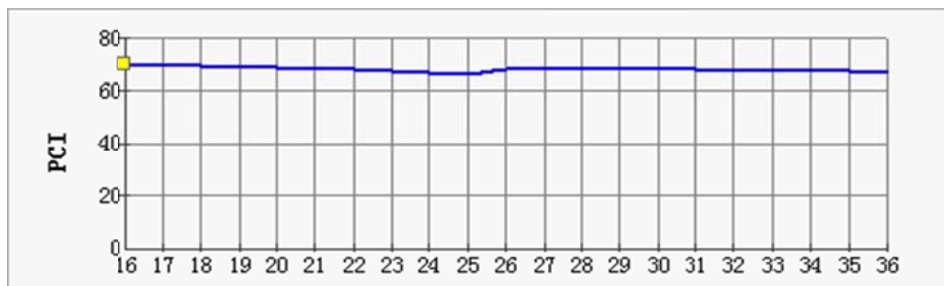


Figura 121: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 2 con il traffico doppio

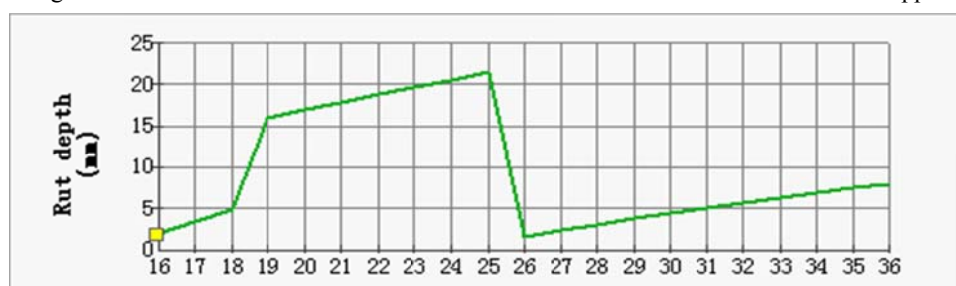


Figura 122: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 2 con il traffico doppio

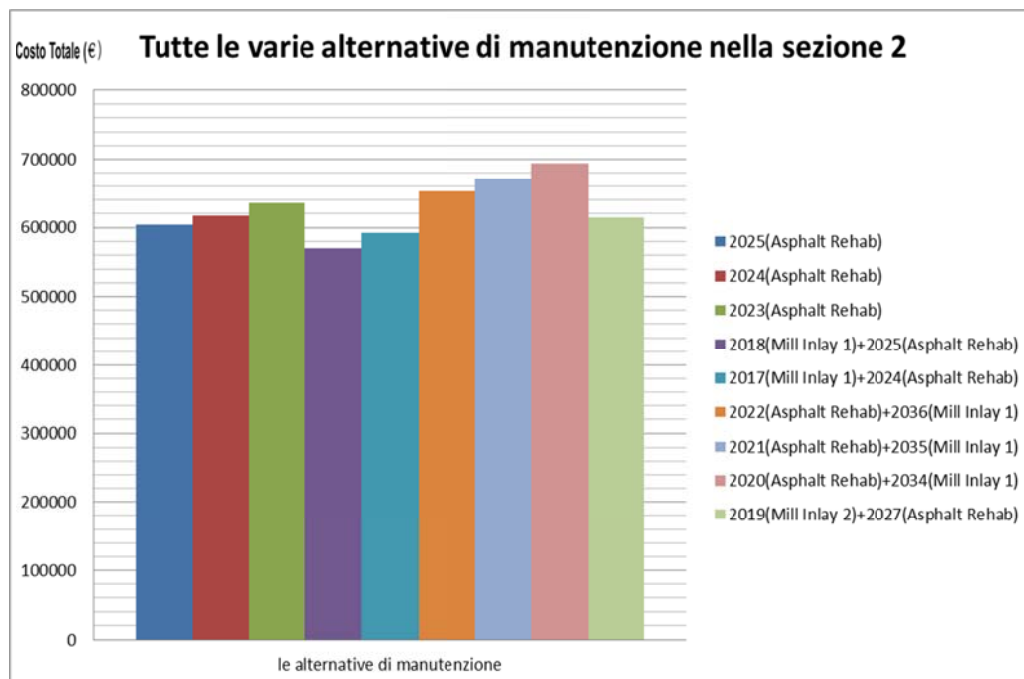


Figura 123: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 2 con il traffico doppio

### Sezione 3

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
250176	241918	2025	Mill. Inlay. 1		
252477	243228	2026	Mill. Inlay. 1		
290003	227323	2021	Mill. Inlay. 1	2033	Mill. Inlay. 1
290233	230205	2022	Mill. Inlay. 1	2034	Mill. Inlay. 1
291105	225620	2020	Mill. Inlay. 1	2032	Mill. Inlay. 1
291623	234104	2023	Mill. Inlay. 1	2035	Mill. Inlay. 1
293725	225267	2019	Mill. Inlay. 1	2031	Mill. Inlay. 1
294022	238886	2024	Mill. Inlay. 1	2036	Mill. Inlay. 1
298070	226453	2018	Mill. Inlay. 1	2030	Mill. Inlay. 1
307678	232657	2017	Mill. Inlay. 1	2029	Mill. Inlay. 1

Dalla tabella possiamo vedere che la settima alternativa ha il costo più basso, però in questo terzo caso il costo praticamente non è aumentato rispetto al costo totale nel caso di traffico normale. Perché nella sezione 3 il traffico è ancora di modesta entità, anche se traffico raddoppiato, quindi risulta nessuno danno significativo. L'alternativa identificata come più economica prevede che si effettui un intervento "Mill. Inlay. 1" nel 2019 e in seguito un intervento "Mill. Inlay. 1" nel 2031. Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 3.



Figura 124: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 3 con il traffico doppio

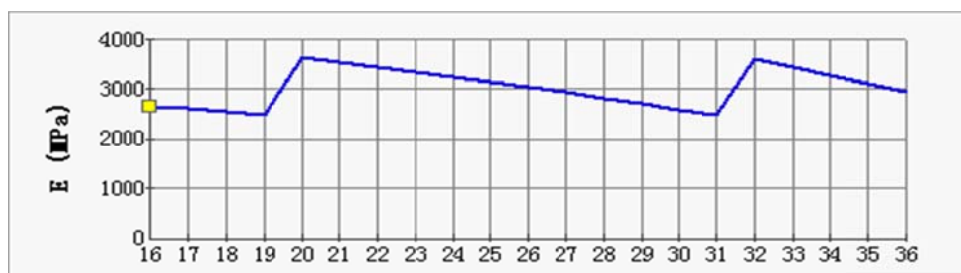


Figura 125: Andamento del modulo strutturale dovuto all'intervento nella sezione 3 con il traffico doppio

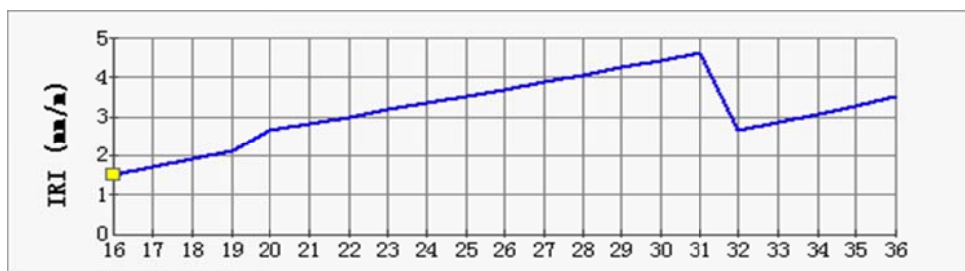


Figura 126: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 3 con il traffico doppio

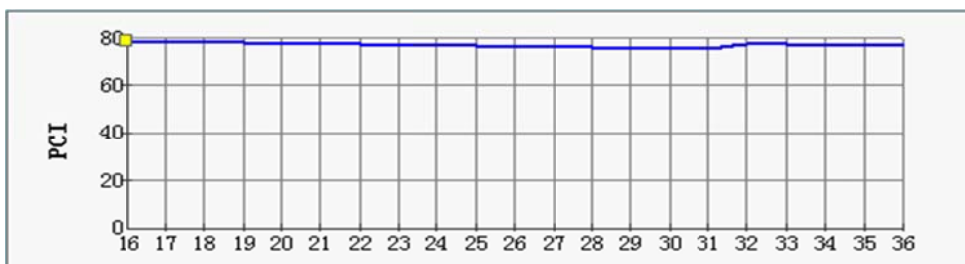


Figura 127: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 3 con il traffico doppio

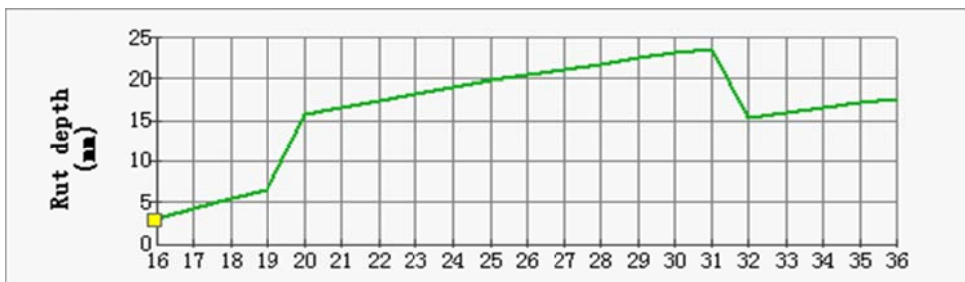


Figura 128: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 3 con il traffico doppio

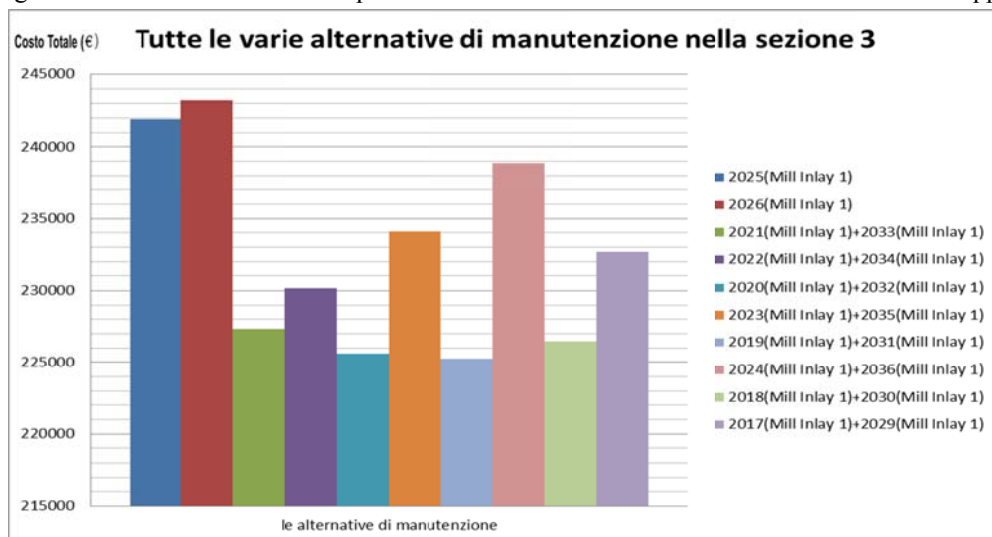


Figura 129: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 3 con il traffico doppio

## 5.6 Confronti tra i due casi

Abbiamo fatto girare il modulo LCCA per entrambi i casi, il software ha individuato l'intervento più economico per ogni caso. Ora facciamo i confronti tra il caso del traffico normale e il caso del traffico raddoppiato.

	costo totale più economico sezione 1	costo totale più economico sezione 2	costo totale più economico sezione 3
Traffico	47286	258845	209039
Traffico x2	109580	569793	225267
Aumento del costo	132%	120%	8%

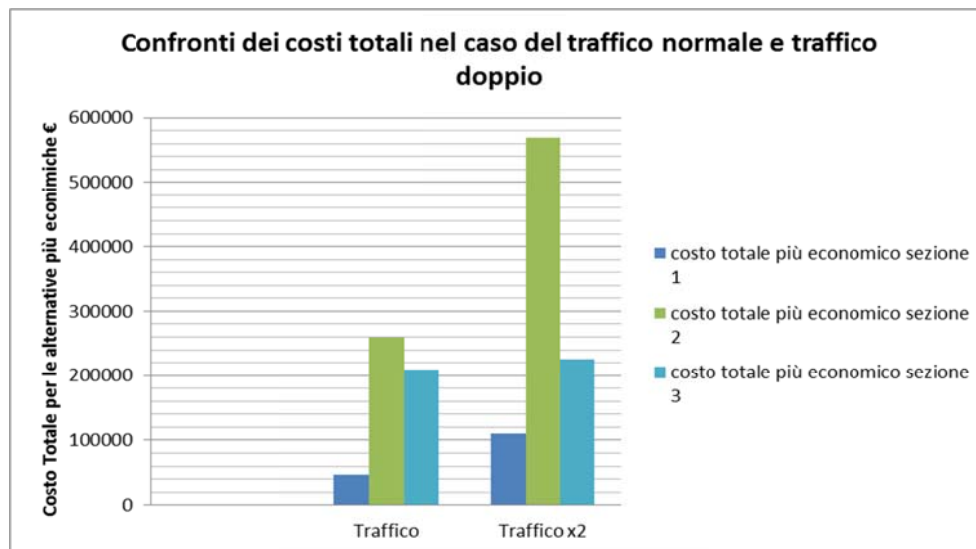


Figura 130: Confronti dei costi totali nel caso del traffico normale e traffico doppio

Da questa figura possiamo vedere che per la sezione 1 e la sezione 2 nel caso di traffico raddoppiato i costi sono aumentati più del doppio rispetto al costo totale alla condizione del traffico normale. Invece per la sezione 3 il costo di intervento non è aumentato significativamente, possiamo considerare in questo caso che il doppio traffico non provochi danni significativi alla pavimentazione, infatti nella condizione di traffico normale la sezione è caratterizzata da un traffico di modesta entità, da per cui anche la condizione della pavimentazione nella sezione 3 è migliore di quella delle sezioni 1 e 2. Quando si ipotizza un raddoppio del traffico, questo risulta ancora modesto, e non provoca i danni significativi alla pavimentazione della sezione analizzata.

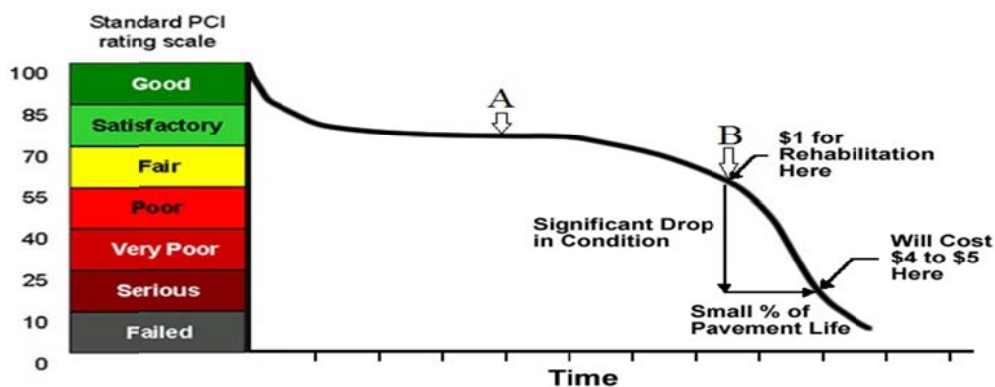


Figura 131: Grafico della condizione della pavimentazione nel tempo

Come rappresentato in figura 131, la sezione 3 è probabilmente nel punto A, quindi se il traffico raddoppia di entità i costi di manutenzione aumentano di poco. Invece la sezione 1 e 2 sono probabilmente nel punto B, quindi andando ad ipotizzare un raddoppio dell'entità del traffico i costi di manutenzione crescono più che proporzionalmente, a causa del cambiamento del tasso di deterioramento.

L'incremento dei costi di manutenzione non segue un'andamento lineare in relazione al traffico. Se il traffico raddoppia, i costi di manutenzione risultano più che raddoppiati. Questo è attribuibile al fatto che la pavimentazione non è nuova, e dipende quindi dalle specifiche condizioni in cui si trova la pavimentazione allo stato attuale.

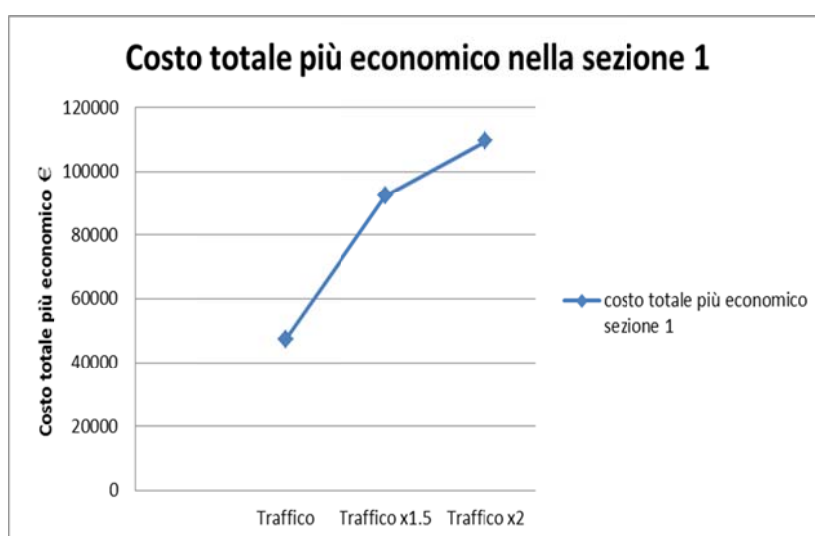


Figura 132: Non linearità del costo totale con il traffico

È facile quindi osservare che le condizioni attuali della pavimentazione delle sezioni osservate sono in condizioni non eccellenti; è infatti ragionevole ipotizzare che la pista oggetto di studio sia stata realizzata negli anni 90, e che nel corso nel tempo non siano stati realizzati significativi interventi manutentive.

## 5.7 Risultati con il traffico aggiuntivo del B777-200

Nel corso della presente Tesi è stata formulata una seconda ipotesi, un'ipotesi ragionevole e realistica, che prevede, a causa di motivi turistici, che durante l'alta stagione (da Maggio fino ad Ottobre) la compagnia Emirates Airlines predisponga sulla pista oggetto di studio decollo e atterraggio di B777-200, per un totale di 120 movimenti aggiuntivi. Possiamo quindi osservare l'influenza dell'aeromobile più oneroso per la sovrastruttura e gli interventi manutentivi necessari e i relativi costi, andando a confrontare il caso di condizione del traffico



normale con il caso di traffico aggiuntivo del B777-200.

### **Sezione 1**

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
72449	53364	2025	Mill.Inlay.2	2033	Mill.Inlay.1
73254	54372	2024	Mill.Inlay.2	2033	Mill.Inlay.1
74423	55815	2023	Mill.Inlay.2	2033	Mill.Inlay.1
75448	64116	2022	Mill.Inlay.1	2030	Mill.Inlay.3
77072	77418	2026	Mill.Inlay.3		
77595	65351	2021	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.3
77858	65911	2020	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.3
80764	67887	2019	Mill.Inlay.1	2028	Mill.Inlay.3
81779	69238	2018	Mill.Inlay.1	2028	Mill.Inlay.3
85623	72127	2017	Mill.Inlay.1	2027	

Dalla tabella possiamo osservare che la prima alternativa è quella che prevede un costo minore, aumentato di circa il 12.9% rispetto al costo totale alla condizione del traffico normale. Quindi un incremento di 120 movimenti del B777-200 all'anno provocano un aumento di 12,9% del costo totale. L'alternativa più economica prevede che nel 2025 si effettui un intervento "Mill. Inlay. 2" e nel 2033 si effettui un intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuti all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 1.

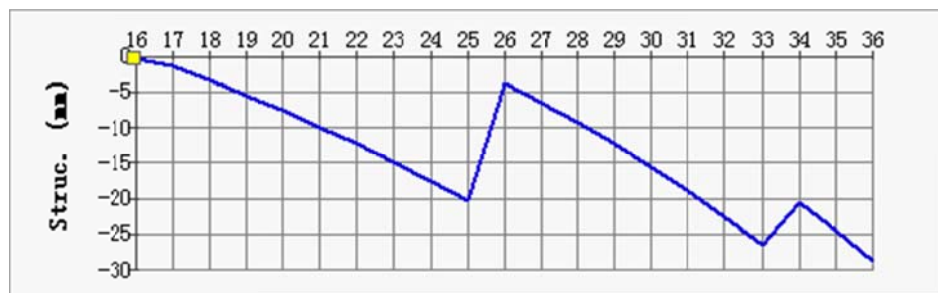


Figura 133: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo



Figura 134: Andamento del modulo elastico dovuto all'intervento nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo

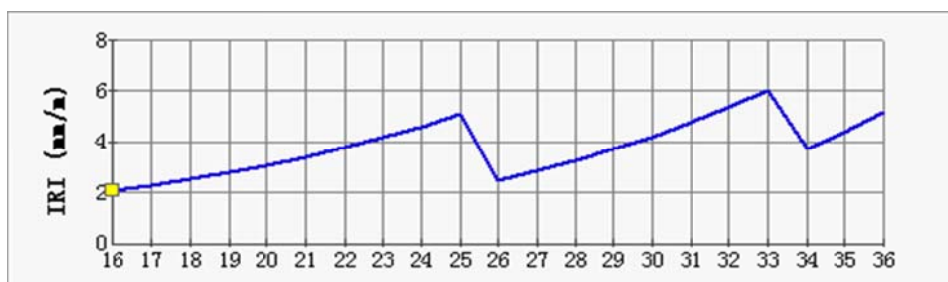


Figura 135: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo

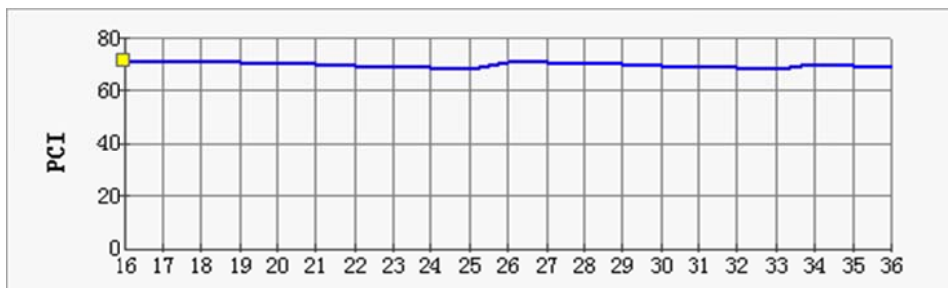


Figura 136: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo



Figura 137: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo

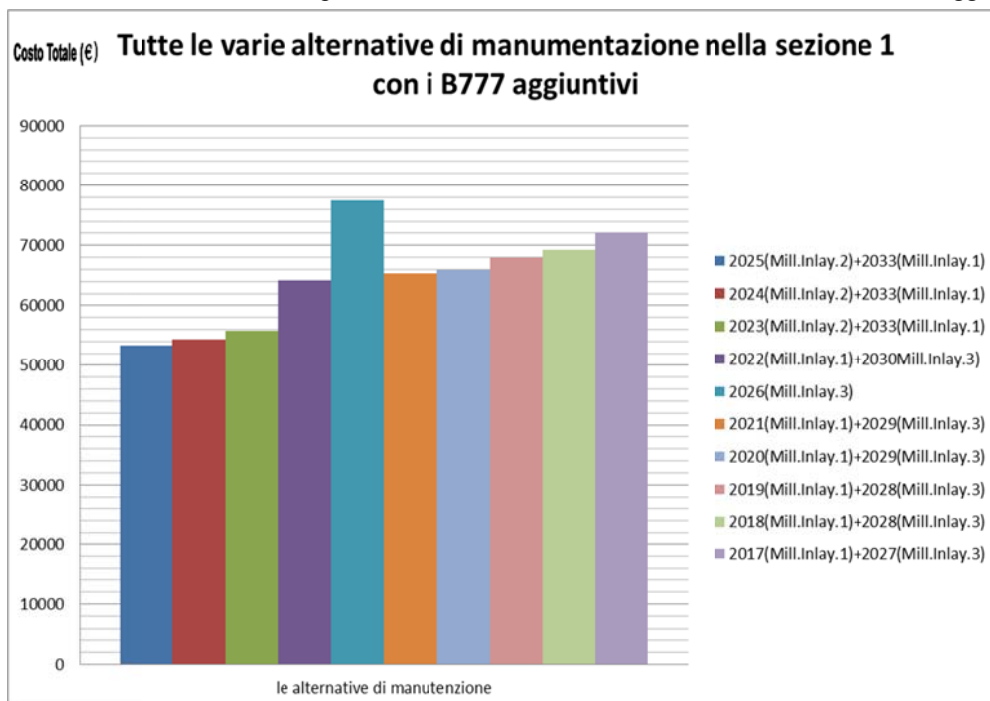


Figura 138: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 1 con il B777-200 aggiuntivo

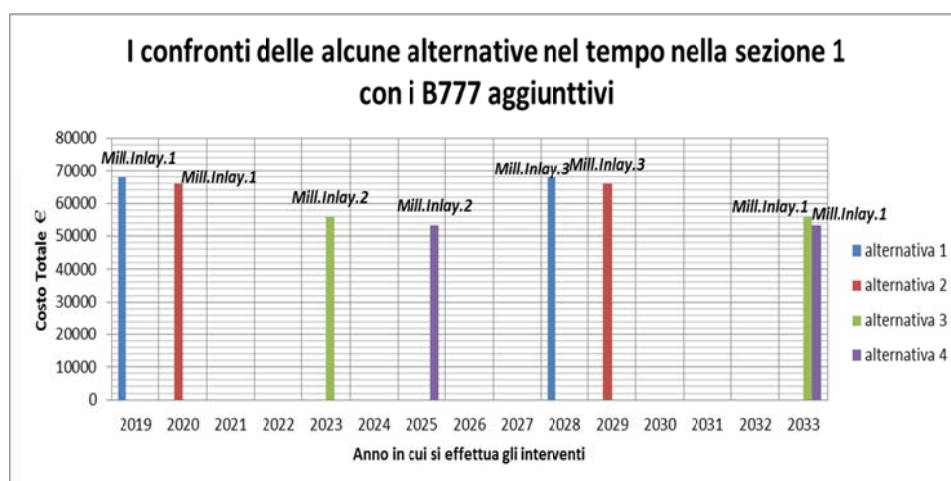


Figura 139: Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 3 con i B777-200 aggiuntivo

## Sezione 2

Agency	Total	Year	Action	Year	Action	Year	Action
313744	260143	2021	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.1		
314001	262188	2023	Mill.Inlay.1	2033	Mill.Inlay.1		
314166	263847	2023	Mill.Inlay.1	2033	Mill.Inlay.1		
315657	265273	2024	Mill.Inlay.1	2034	Mill.Inlay.1		
319557	272545	2020	Mill.Inlay.1	2032	Mill.Inlay.1		
323668	275536	2025	Mill.Inlay.1	2034	Mill.Inlay.1		
391899	283952	2019	Mill.Inlay.1	2031	Mill.Inlay.1		
397564	291474	2026	Mill.Inlay.1	2035	Mill.Inlay.1		
407704	297786	2017	Mill.Inlay.1	2029	Mill.Inlay.1	2036	Mill.Inlay.1
423962	310088	2018	Mill.Inlay.1	2030	Mill.Inlay.2		

Dalla tabella possiamo osservare che la prima alternativa è quella che prevede il costo minore, aumentato di circa il 0.5% rispetto al costo totale di intervento in condizione del traffico normale. Perciò 120 movimenti aggiuntivi del B777-200 all'anno rispetto agli altri traffici non determinano alcun danno significativo. L'alternativa di intervento più economica in questo caso prevede che nel 2021 si effettui un intervento "Mill. Inlay. 1" e nel 2032 un secondo intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuti all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 1.

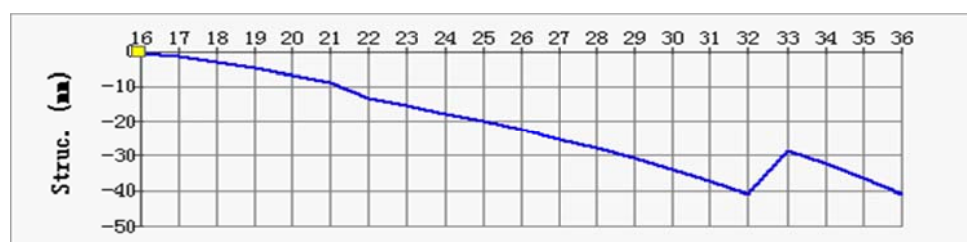


Figura 140: Andamento del cambiamento strutturale dovuto all'intervento nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo

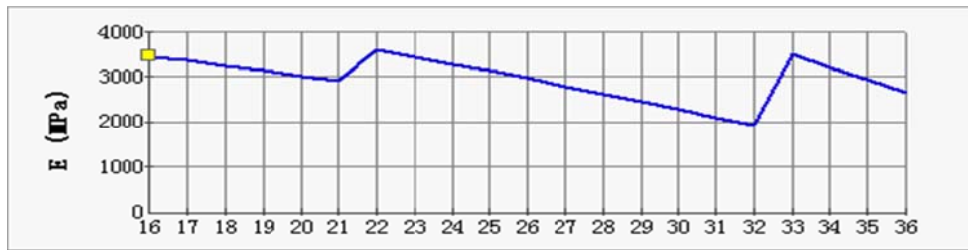


Figura 141: Andamento del modulo elastico dovuto all'intervento nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo



Figura 142: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo

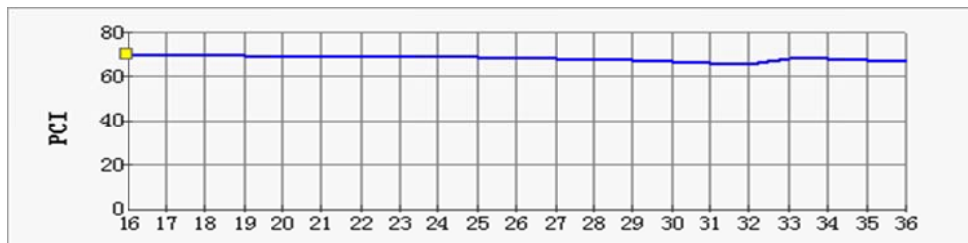


Figura 143: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo

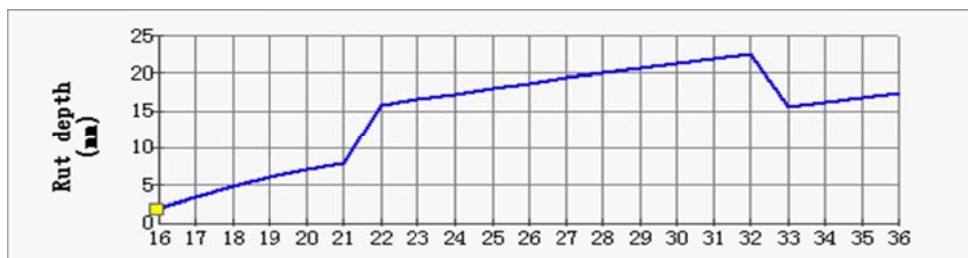


Figura 144: Andamento del Rut depth dovuto all'intervento nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo

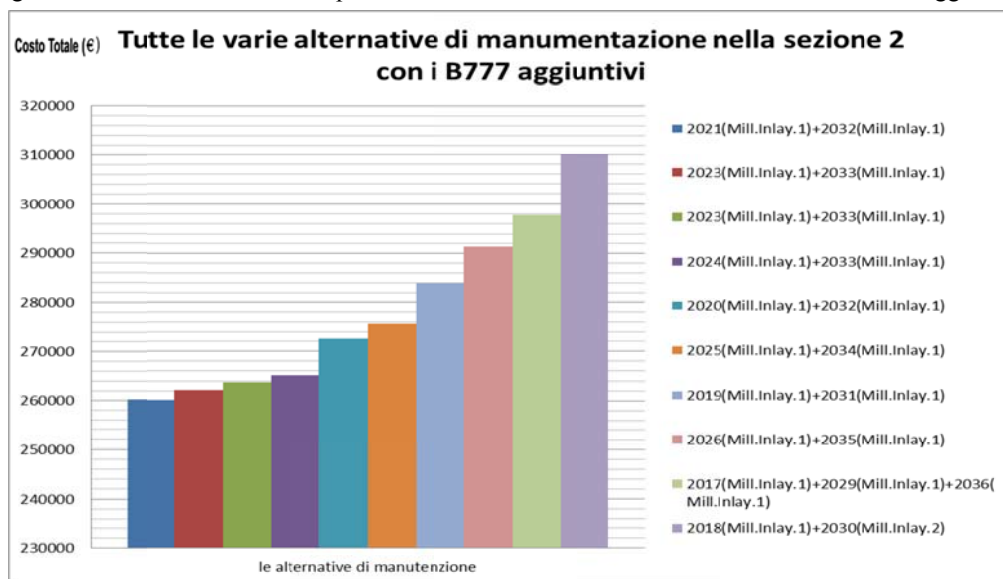


Figura 145: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 2 con il B777-200 aggiuntivo



Figura 146: Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 2 con i B777-200 aggiuntivo

### Sezione 3

Agency	Total	Year	Action	Year	Action
250176	225644	2025	Mill. Inlay. 1		
252477	226932	2026	Mill. Inlay. 1		
290003	211540	2021	Mill. Inlay. 1	2033	Mill. Inlay. 1
290233	214296	2022	Mill. Inlay. 1	2034	Mill. Inlay. 1
291105	209942	2020	Mill. Inlay. 1	2032	Mill. Inlay. 1
291623	218051	2023	Mill. Inlay. 1	2035	Mill. Inlay. 1
293725	209675	2019	Mill. Inlay. 1	2031	Mill. Inlay. 1
294022	222665	2024	Mill. Inlay. 1	2036	Mill. Inlay. 1
298070	210931	2018	Mill. Inlay. 1	2030	Mill. Inlay. 1
307678	217215	2017	Mill. Inlay. 1	2029	Mill. Inlay. 1

Dalla tabella possiamo vedere che per la sezione tre nel caso di incremento del traffico di B777-200 la settima alternativa è quella che prevede un minore costo degli interventi, con un incremento di costo praticamente nullo rispetto alla condizione del traffico in condizioni normali. Quindi questo incremento di 120 movimenti del B777-200 all'anno rispetto agli altri traffici non risultano nessuno danno significativo. Per la alternativa economica nel 2019 si effettuerà l'intervento "Mill. Inlay. 1" e nel 2031 si effettuerà un intervento "Mill. Inlay. 1". Si riportano di seguito i grafici principali delle prestazioni della pavimentazione dovuta all'alternativa di manutenzione più economica nella sezione 3.

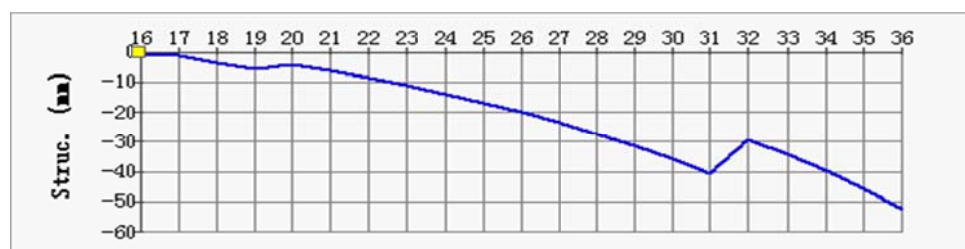


Figura 147: Andamento del struc. dovuto all'intervento nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo



Figura 148: Andamento del E dovuto all'intervento nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo

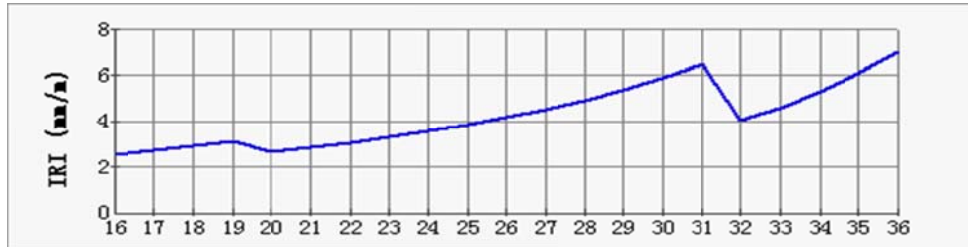


Figura 149: Andamento dell'IRI dovuto all'intervento nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo

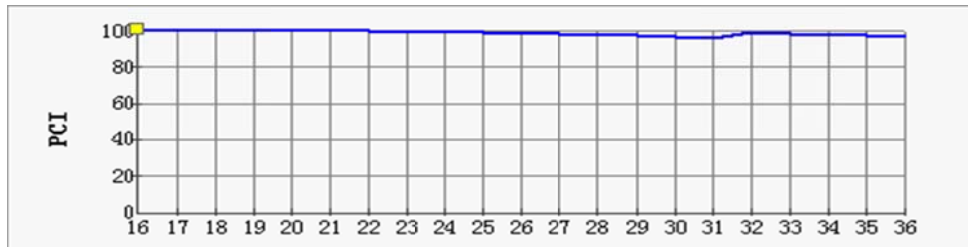


Figura 150: Andamento del PCI dovuto all'intervento nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo

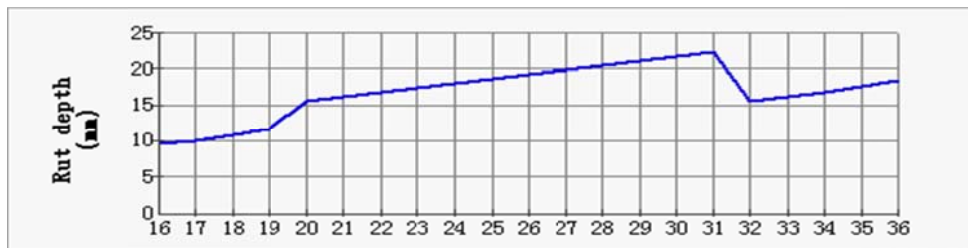


Figura 151: Andamento del RD dovuto all'intervento nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo

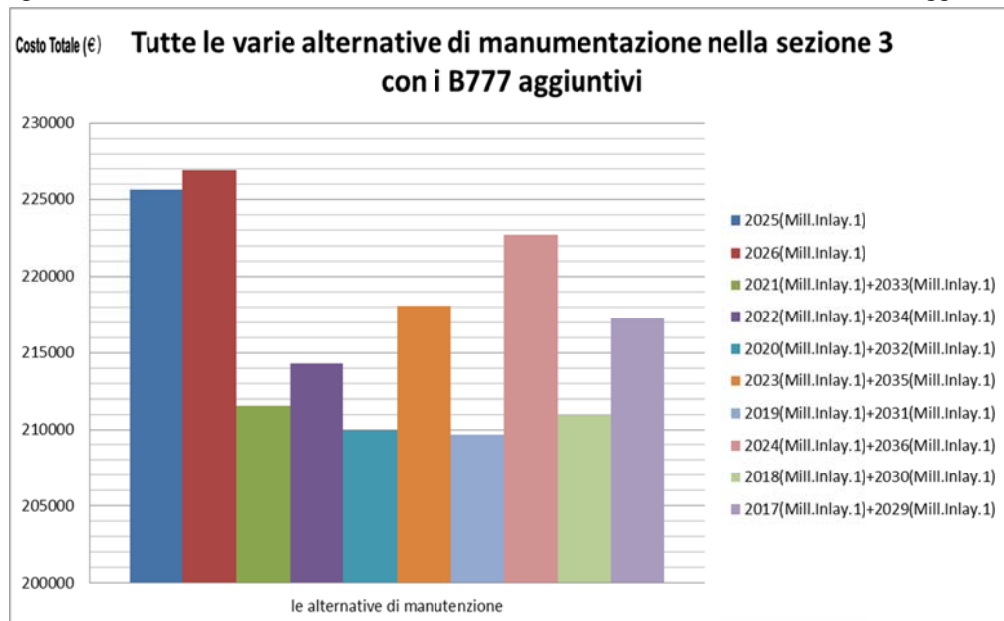


Figura 152: Tutte le varie alternative di manutenzione nella sezione 3 con il B777-200 aggiuntivo



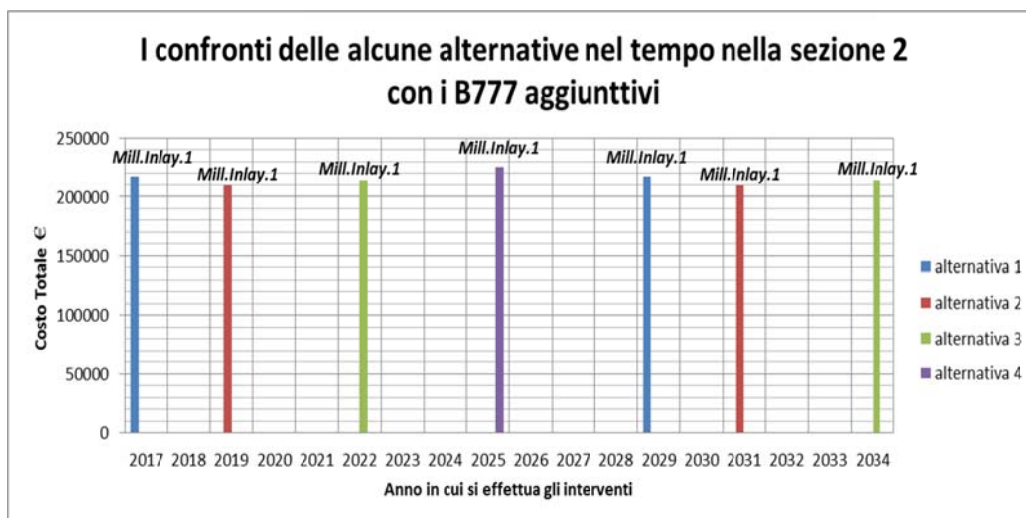


Figura 153: Confronti delle alcune alternative nel tempo nella sezione 3 con i B777-200 aggiuntivo

## 5.8 Confronti tra il caso del traffico normale e il caso del traffico con il B777-200 aggiuntivo

Dopo aver calcolato i risultati nel caso del traffico aggiuntivo del B777-200, possiamo andarli a confrontare con quelli nel caso condizioni ordinarie di traffico:

	costo totale più economico sezione 1	costo totale più economico sezione 2	costo totale più economico sezione 3
Traffico	47286	258845	209039
Traffico+B777-200	53364	260143	209675
Aumento del costo	13%	1%	0%

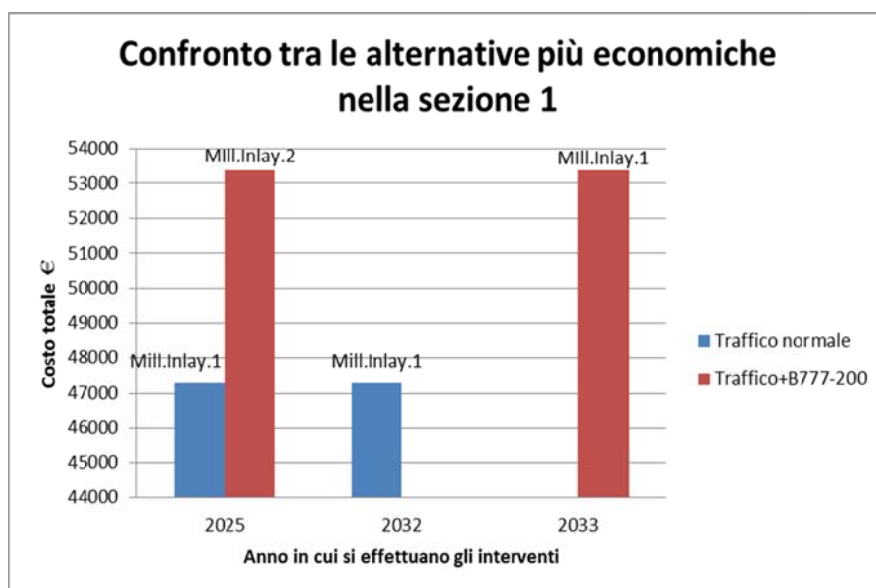


Figura 154: Confronto tra le alternative più economiche nella sezione 1 con il caso “Traffico normale” e il caso “Traffico+ B777-200”

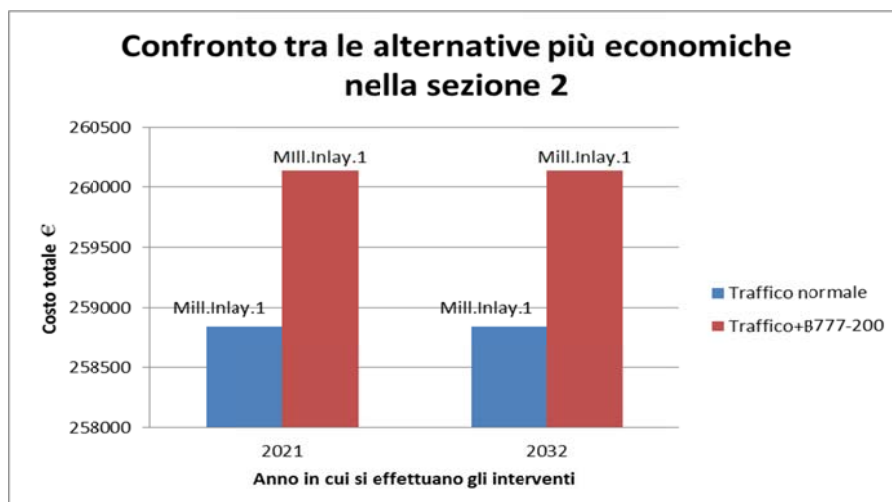


Figura 155: Confronto tra le alternative più economiche nella sezione 2 con il caso “Traffico normale” e il caso “Traffico+ B777-200”

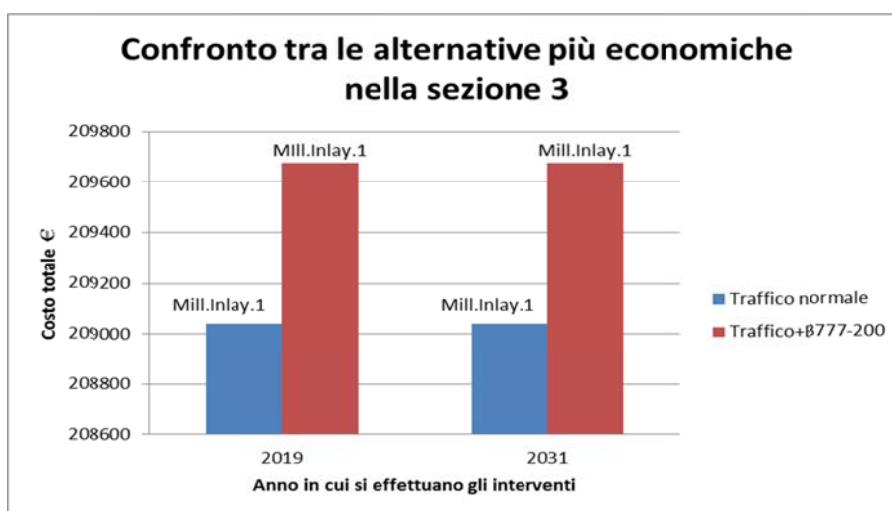


Figura 156: Confronto tra le alternative più economiche nella sezione 3 con il caso “Traffico normale” e il caso “Traffico+ B777-200”

Da questo confronto possiamo vedere che il costo totale è aumentato circa il 13% per la sezione 1, si osserva cioè un incremento non trascurabile. Quindi il traffico B777-200 aggiuntivo influenza significativamente la pavimentazione nella sezione 1, provocando danni non trascurabili. Invece il costo totale di intervento non mostra significativi incrementi nelle sezioni 2 e 3, inoltre nel caso delle sezioni 2 e 3 si osserva che, in entrambi i casi, le alternative più economiche prevedono i medesimi interventi, da realizzare negli stessi tempi. Da questo punto di vista, il traffico B777-200 aggiuntivo non provoca nessun danno aggiuntivo nelle sezioni 2 e 3. Riferendoci ai risultati dei confronti nel paragrafo 5.6, si può ipotizzare che la condizione della pavimentazione nella sezione 3 sia ancora in buone condizioni, mentre invece la pavimentazione della sezione 1 sia in condizioni molto



degradate.

## 5.9 Conclusioni delle elaborazioni

Nel corso delle elaborazioni fatte nella presente Tesi sono state assunte due ipotesi distinte di traffico, osservandone gli effetti in termini di incidenza dei costi di intervento di manutenzione e riabilitazione. Nel primo caso si è previsto un traffico di entità doppia rispetto a quello circolante in condizioni normali; questa prima ipotesi è molto cautelativa ma è stata formulata con l'intento di andare a massimizzare la variazione delle condizioni delle pavimentazioni analizzate e conseguentemente i costi relativi alla manutenzione. La seconda ipotesi prevede invece un incremento di 120 movimenti del B777-200 durante il periodo estivo (Maggio-Ottobre), questa seconda ipotesi, a differenza della prima, risulta essere realistica e ragionevole, compatibile con l'incremento dei movimenti aerei che si verifica durante la stagione estiva (alta stagione). A seguire sono riportate in tabella le variazioni dei costi di manutenzione nei diversi casi studiati.

	Sezione	1	2	3
Traffico normale	Lunghezza(m)	200	1200	1100
	Costo (€)	47286	258845	209039
	Costo/m(€/m)	236.43	215.7	190.03
	Costo totale(€)	515170		
Traffico doppio	Costo (€)	109580	569793	225267
	Costo/m(€/m)	547.9	474.83	204.79
	Costo totale(€)	904640		
Traffico+B777-200	Costo (€)	53364	260143	209675
	Costo/m(€/m)	266.82	216.79	190.61
	Costo totale(€)	523182		
Traffico doppio rispetto al traffico normale	Aumento del costo totale	75.60%		
	Aumento del costo ogni sezione	132.00%	120.00%	8.00%
Traffico +B777-200 rispetto al traffico normale	Aumento del costo totale	1.56%		
	Aumento del costo ogni sezione	12.85%	0.50%	0.30%

Figura 157: Confronti dei costi di manutenzioni tra le diverse ipotesi del traffico

Dalla figura 157 possiamo ricavare le informazioni intuitivamente, raddoppiando il traffico il costo di manutenzione aumenta del 75,6% complessivamente. Ma gli incrementi

sono completamente diversi a seconda della differente sezione omogenea considerata, essi dipendono infatti dalle condizioni attuali delle pavimentazioni. Nel caso di traffico raddoppiato nella sezione 1 e nella sezione 2 i costi aumentano di più del doppio rispetto al costo totale in condizione di traffico normale. Ne consegue che le sezioni 1 e 2 sono le sezioni che presentano le condizioni peggiori (con costo unitario di manutenzione maggiore) tali per cui il costo di manutenzione aumenta in misura ben maggiore rispetto all'incremento del traffico.

Nell'ipotesi di un lieve incremento di traffico, causato da un plausibile movimento aggiuntivo del B777-200 durante la stagione estiva, si osserva che la sezione 1 mostra anche in questo secondo caso un aumento del costo di manutenzione significativo, mentre nelle sezioni 2 e 3 non si verificano danni significativi, che non determinano sostanziali incrementi dei costi di manutenzione. In sintesi possiamo dire che la sezione 1, in condizioni estremamente danneggiate, risulta essere molto sensibile al traffico, e sarà perciò necessario focalizzare le attenzioni su questa sezione. Serviranno cioè interventi di manutenzione preventiva, andando a monitorare, avvalendosi di un sistema di controllo delle pavimentazioni, con frequenza maggiore le condizioni della pavimentazione della sezione 1.

## CONCLUSIONI

Negli ultimi anni si è assistito ad una crescita esponenziale del settore dell'aviazione civile, come emerge dai dati preliminari pubblicati dall' International Civil Aviation Organization-ICAO che mostrano come il numero totale di passeggeri trasportati sui servizi di linea aerea sia salito a 3,5 miliardi nel 2015, con un aumento del 6,4% rispetto allo stesso periodo dello scorso anno.

Il numero delle partenze ha raggiunto circa 34 milioni a livello globale, e il traffico passeggeri mondiale, espresso in termine di passeggeri-chilometri, ha registrato un incremento del 6,8 %, con circa 6.56 miliardi di passeggeri-chilometri.

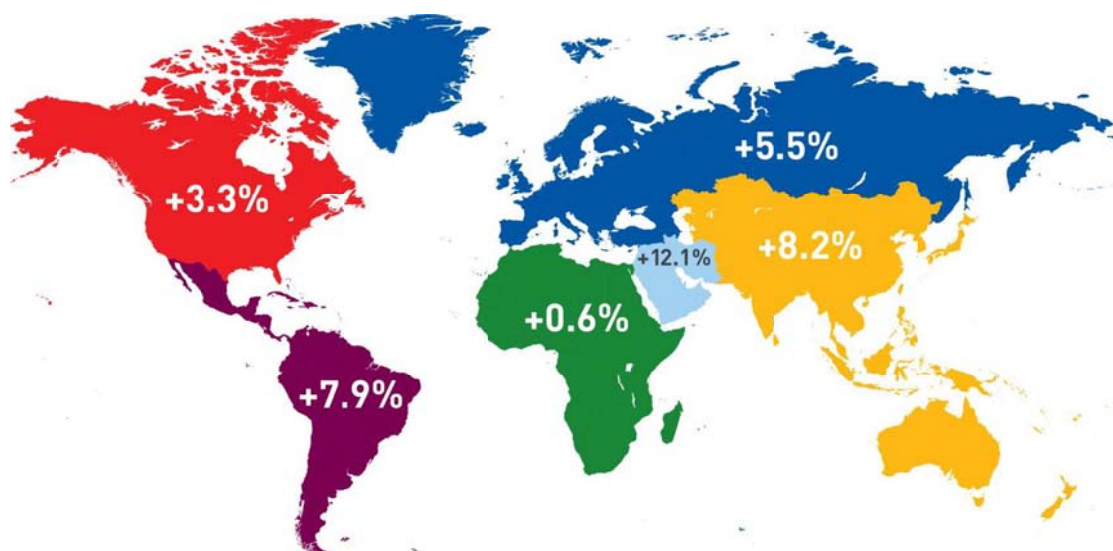


Figura 158: Aumenti del traffico passeggeri mondiale in passeggeri-chilometri nel 2015

Gli aeroporti, sono le strutture fondamentale per l'Aviazione Civile, essendo interessati da tutti i servizi per i passeggeri e dal traffico aereo stesso; l'elemento più importante e essenziale è la pista che deve essere in grado di supportare i carichi notevoli sia dinamici che statici causati dal passaggio degli aerei, deve quindi avere un sistema efficiente per monitorare le condizioni della pavimentazione e pianificarne la manutenzione, al fine di mantenerne la buona qualità e la sicurezza.

La presente Tesi si pone come obiettivo l'analisi delle pavimentazioni aeroportuali, e di determinarne una scala di priorità e il tempo ottimale di intervento economicamente

vantaggioso, implementando un Airport Pavement Management System (APMS), con l'aiuto del software ELMOD 6.

L'APMS si propone come strumento fondamentale per la programmazione degli interventi manutentivi e come supporto per le Società di Gestione Aeroportuali per assumere decisioni mirate a garantire la sicurezza e la qualità della pista e per l'elaborazione di una strategia economicamente vantaggiosa di M&R (Manutenzione & Riabilitazione), studiando e predicendo le prestazioni attuali e future delle pavimentazioni in un aeroporto di tipo network.

Per un corretto funzionamento dell'APMS sono necessari 4 componenti principali:

- ♦ Una banca dati, per la raccolta di tutte le informazioni sulle pavimentazioni;
- ♦ Una serie di indagini sullo stato della pavimentazione, svolte con cadenza regolare;
- ♦ Un sistema di analisi dei dati;
- ♦ Procedure di gestione.

I dettagli della implementazione del sistema di gestione della manutenzione (AMPS) sono definiti nelle Normative di ciascun paese. Negli ultimi trent'anni si è notevolmente sviluppato il campo della gestione e della manutenzione della pavimentazione aeroportuali, anche se le attuazioni sono state messe in atto solo da pochi anni, e nel mondo solo qualche paese ha focalizzato la sua attenzione nella realizzazione di APMS.

Le prime Normative complete sono state pubblicate in America dalla Federal Aviation Administration (FAA), parallelamente agli Stati Uniti, anche il Canada studia e attua piani di gestione delle pavimentazioni.

Dopo i primi sviluppi in America e Canada, questo concetto è ha cominciato ad interessare anche l'Europa, ad esempio in Italia sono state pubblicate nel 2015 "Le linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni (AMPS)".

Dopo i successi dei paesi dell'America meridionale, Canada, Nuova Zelanda, Europa, successivamente i paesi Asiatici iniziano a lavorare su questo campo, ad esempio in Cina sono state elaborate Normative per la implementazione dell'AMPS.

Per quanto riguarda il software utilizzato per la redazione di un APMS che deve avere la capacità di analizzare i database al fine di quantificare la condizione strutturale e funzionale della pavimentazione allo stato attuale, anticipare i problemi futuri, selezionare e programmare

le migliori strategie di manutenzione e riabilitazione a breve e lungo termine, nel mercato commerciale esistono diversi programmi, come PAVER della FAA, PAVER<sup>TM</sup> dell' U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, AIRPORTS e ELMOD 6 della DYNATEST, ect.

A tal fine è stata effettuata una applicazione della implementazione dell'AMPS su una pista aeroportuale italiana utilizzando il modulo LCCA di ELMOD 6. Per fare funzionare il programma è stato necessario registrare i seguenti dati:

- ♦ Dati di portanza della pavimentazione, raccolti tramite apparecchiatura deflettometrica (Fast Falling Weight Deflectometer-FFWD), ed elaborati mediante backanalysis, noti gli spessori di ciascuno strato della pavimentazione, al fine di stimare i moduli elastici di ciascuno strato.
- ♦ Dati relativi agli spessori di ciascun strato dell'infrastruttura ricavati utilizzando il Ground Penetrating Radar (GPR).
- ♦ Dati dei rilievi sulle condizioni funzionali delle pavimentazioni valutando gli ammaloramenti superficiali, regolarità longitudinale e trasversale, macrotestitura utilizzando il Multi Functional Vehicle (MFV).
- ♦ Dati relativi allo spettro di traffico.
- ♦ Dati delle alternative d'intervento da realizzare.

Una volta raccolti tutti i dati, si può far girare il programma per analizzarli.

Nella presente Tesi sono state ipotizzate 2 distinte situazioni di traffico per osservare e studiare come varia in relazione a ciò la condizione della pavimentazione e il costo di manutenzione, senza il limite di budget. L'ipotesi di un traffico raddoppiato è cautelativa, ma dai risultati dell'analisi possiamo vedere come gli aumenti del costo di manutenzione nelle diverse sezioni omogenee non siano uguali. Le sezioni in condizioni strutturali e funzionali peggiori (sezione 1 e 2) aumentano più del doppio, quando viene ipotizzato un traffico raddoppiato; cioè le sezioni che evidenziano caratteristiche scarse si deteriorano rapidamente, mentre le sezioni (sezione 3) caratterizzate da condizioni migliori non manifestano danni significativi.

Nell'ipotesi, più realistica, di un lieve incremento dei movimenti che interessano la pista, è stato osservato che anche in questo caso la sezione 1, sezione in condizioni strutturali peggiori, necessita di significativo aumento del costo di manutenzione, ed è quindi molto

sensibile all'aumento del traffico.

Tutte queste considerazioni sono state elaborate avvalendosi dell'AMPS.

Quindi l'AMPS è risultato essere un valido strumento per i Gestori Aeroportuali veramente attendibile e utile, capace di analizzare la condizione attuale e futura della pavimentazione, per selezionare e programmare le migliori strategie di manutenzione e riabilitazione ipotizzando diversi traffici. Aiuta quindi tecnici e gestori a decidere "come", "dove", "quando" intervenire preventivamente per il raggiungimento della vita utile teorica della pavimentazione con o senza il limite di budget.

L'APMS è anche uno strumento utile per la quantificazione dei costi di esercizio: è possibile calcolare tutti gli effetti di un piccolo aumento del traffico sulle pavimentazione in termini di budget necessario, quindi le Società di Gestione possono sapere facilmente determinare gli oneri corrispondenti ad un eventuale movimento aggiuntivo richiesto da una compagnia di volo.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] FAA AC 150/5380-7B “Airport Pavement Management” 2014
- [2] FAA AC 150/5370-11B “Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements” 2011
- [3] FAA AC 150/5320-6F “Airport Pavement Design and Evaluation” 2016
- [4] FAA AC 150/5320-12C “Measurement, Construction, and Maintenance of Skid Resistant Airport Pavement Surfaces” 1997
- [5] FAA AC 150/5380-6C “Provides Guidelines and Procedures for Maintaining Airport Pavements” 2014
- [6] ICAO “Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation-Volume I -Aerodrome Design and Operations” 2013
- [7] ICAO Doc 9137 “Airport Service Manual, part 9 (Airport Maintenance Practices), first edition” 1984
- [8] EASA “Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design-CS-ADR.DSN” e “Aerodromes Acceptable Means of Compliance and Guidance Material” 2014
- [9] NORME ASTM D5340 “Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys” 1988
- [10] TRANSPORT CANADA AC 302-016 “Airport Pavement Management System” 2016
- [11] ENAC “Le nuove linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni (AMPS)” 2015
- [12] CAAC MH/T5024 “Technical Specifications of Aerodrome e Pavement Evaluation and Management” 2009
- [13] CAAC MH/T5110 “In-situ measurement specification for pavement and subgrade of civil airports” 2015
- [14] DYNATEST “Detailed Technical Description AIRPORTS PMS incl survey tools” 2013